



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FUNCIONAL DE LA COLUMNA CERVICAL Y HOMBROS MEDIANTE EL USO DE REALIDAD VIRTUAL

Autor

Héctor Gómez Royo

Director

José Javier Marín Zurdo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FUNCIONAL DE LA COLUMNA CERVICAL Y HOMBROS MEDIANTE EL USO DE REALIDAD VIRTUAL

RESUMEN

El presente proyecto está centrado en el marco de métodos de evaluación de la capacidad funcional cervical y de los hombros y surge de la necesidad de implantar nuevos métodos que utilicen realidad virtual para dicha evaluación.

Existen muchas razones por las que ya se están utilizando estas nuevas tecnologías de realidad virtual en varios campos y está actualmente en fase de expansión, incorporándose a trabajos muy diversos. Se recogen los estudios publicados de aplicación de estas tecnologías, principalmente en el ámbito de la salud.

En el proyecto se presentan dos métodos de evaluación funcional que pretenden complementar y mejorar los sistemas de capacidad funcional actuales, mediante el uso de la realidad virtual. El primer método está dirigido a la valoración del rango cervical mediante una prueba en la que se evaluará a los sujetos dentro de unos escenarios virtuales. El segundo se basa en el uso de un entorno virtual capaz de emular a un sistema que actualmente precisa de un dispositivo físico específico para la valoración de la capacidad funcional de la columna cervical y hombros.

En cada uno de los métodos presentados se incluyen la descripción de la metodología utilizada y la tecnología e instrumentación necesaria, tanto para la prueba normal como para la que utiliza entornos virtuales. Ello permitirá contrastar ambos enfoques.

Se incluyen los resultados de las pruebas llevadas a cabo en una muestra de personas que han participado en este estudio. El análisis de dichos resultados, considerando las características de los sujetos participantes, ha permitido extraer conclusiones de la aplicación práctica de los citados métodos, en relación a sus ventajas y limitaciones.

Finalmente se explicitarán las líneas futuras de aplicación de la realidad virtual y las diferentes posibilidades que podrían ofrecernos en el ámbito que nos ocupa de la evaluación de la capacidad funcional.

AGRADECIMIENTOS

Es para mí un privilegio haber podido realizar un trabajo que ilustra una parte de un proyecto de investigación en el que estoy involucrado, dentro del grupo de investigación ID_ERGO del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón.

Me gustaría agradecer a mi director del trabajo fin de grado y coordinador del grupo de investigación, José Javier Marín Zurdo, la oportunidad de realizar un trabajo único y tan interesante, sin olvidar su interés y disposición para resolver cualquier consulta.

También querría agradecer la ayuda prestada al resto de personas que forman parte de este grupo de investigación: Laura Savalli, Cristina Royo, Cristina Yubero, José Manuel Auría, Isabel García y Marta Bailo. No querría olvidar la ayuda de José Manuel Arredondo y Dolores Ramón, médicos forenses del Instituto de Medicina Legal de Aragón, quienes me han acompañado en varias ocasiones.

Aunque no se mencionen sus nombres por cuestiones de confidencialidad, me gustaría dar las gracias a todas las personas que se han ofrecido voluntariamente para la realización de las pruebas, ya que sin las cuales este trabajo no tendría sentido.

Por otro lado, decir que la realización de este trabajo fin de grado no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia y de mi novia Isabel, quien ha confiado en mí en todo momento y me ha animado en numerosas ocasiones. Agradecer todo el apoyo recibido a mis hermanos Jorge y Carmen, y a mi padre Carlos.

Para finalizar, querría dedicar una mención especial a mi madre M^a Jesús, que ya no nos acompaña en este mundo. Por todo lo que ha hecho por mí estaré agradecido eternamente.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	OBJETO DEL PROYECTO	6
2	ALCANCE	8
3	ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE NECESIDAD	9
4	ESTADO DE LA TÉCNICA	10
5	INSTRUMENTACIÓN	16
5.1	SISTEMA "MOVE HUMAN-SENSORS"	16
5.1.1	PROCEDIMIENTO	16
5.1.2	SENSORES INERCIALES	17
5.1.3	AVATARES	18
5.1.4	CONSIDERACIONES	19
5.2	DISPOSITIVOS HMD	19
5.2.1	GAFAS DE REALIDAD VIRTUAL OCULUS	19
5.2.2	GAFAS DE REALIDAD VIRTUAL VUZIX	20
5.3	DISPOSITIVO M&R FÍSICO	21
6	MUESTRA	23
6.1	EXPLORACIÓN MÉDICA Y CONSENTIMIENTO INFORMADO	23
6.2	MUESTRA DE PERSONAS NORMALES	23
6.3	MUESTRA DE SUJETOS CON DISCAPACIDADES (IMLA)	24
7	PRUEBAS	25
7.1	PRUEBA DEL RANGO DE LA COLUMNA CERVICAL	25
7.1.1	PROCEDIMIENTO	25
7.1.2	MOVIMIENTOS ESTUDIADOS	28
7.1.3	DATOS OBTENIDOS	31
7.1.4	TRATAMIENTO DE DATOS	33
7.2	PRUEBA DE CAMPIMETRÍA FUNCIONAL CON EL DISPOSITIVO M&R	34
7.2.1	PROCEDIMIENTO	34
7.2.2	MOVIMIENTOS ESTUDIADOS	38
7.2.3	DATOS OBTENIDOS	40
7.2.4	TRATAMIENTO DE DATOS	42
8	RESULTADOS	43

8.1	PRUEBA DEL RANGO DE LA COLUMNA CERVICAL.....	43
8.1.1	RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DE PERSONAS NORMALES	43
8.1.2	RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DE SUJETOS DEL IMLA.....	45
8.2	PRUEBA DE CAMPIMETRÍA FUNCIONAL CON EL DISPOSITIVO M&R	45
8.2.1	RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DE PERSONAS NORMALES	45
9	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	47
9.1	PRUEBA DEL RANGO DE LA COLUMNA CERVICAL.....	47
9.1.1	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA NORMAL	47
9.1.2	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DEL IMLA.....	48
9.2	PRUEBA DE CAMPIMETRÍA FUNCIONAL CON EL DISPOSITIVO M&R	49
10	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	50
11	REFERENCIAS	52
	ANEXOS	54
	ANEXO I. EQUIPOS COMPLEMENTARIOS PARA LA CAPTURA.....	54
	ANEXO II. COLOCACIÓN DE LOS SENSORES Y FIJACIONES	56
	ANEXO III. CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO FÍSICO M&R	58
	ESQUEMA DE LAS POSICIONES DEL ASIENTO EN EL DISPOSITIVO.....	58
	DISPOSITIVO DE CONTROL DE “LEDs”	58
	NUMERACIÓN DE LAS TORRES E IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDEJAS.....	59
	COMPLEMENTOS DEL DISPOSITIVO PARA REDUCIR LA VISIÓN.....	60
	ANEXO IV. CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS VIRTUALES.....	61
	SISTEMA DE COORDENADAS Y NIVELES DEL ESPACIO DELIMITADO	61
	DETALLE DE LAS TRAYECTORIAS SEGUIDAS SEGÚN EL ESCENARIO ESCOGIDO.....	63
	ANEXO V. DATOS OBTENIDOS EN PRUEBA DE COLUMNA CERVICAL	67
	ANEXO VI. DATOS OBTENIDOS EN PRUEBA CERVICAL VIRTUAL.....	71
	ANEXO VII. DATOS OBTENIDOS CON EL DISPOSITIVO M&R	73
	ANEXO VIII. TABLAS DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LAS MUESTRAS EN LAS PRUEBAS	77

1 OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del proyecto es el desarrollo de un sistema de valoración de la capacidad funcional de la columna cervical y hombros, mediante el uso de realidad virtual.

Se presentan dos métodos de evaluación funcional mediante realidad virtual. El primero se trata de un complemento para la evaluación funcional del rango cervical. El segundo consiste en la emulación mediante realidad virtual de un dispositivo físico utilizado para la evaluación funcional cervical y hombros.

El proyecto está enfocado a la evaluación de la capacidad funcional cervical y de los hombros dentro del ámbito biomédico, siendo esta evaluación llevada a cabo frecuentemente por institutos de medicina legal, servicios de prevención propios o ajenos o bien por gabinetes periciales de valoración del daño corporal.

La metodología de evaluación que se propone en este proyecto se basa en la captura del movimiento humano mediante un sistema basado en sensores para un posterior procesamiento de datos y un análisis biomecánico de los movimientos capturados [1]. En concreto, para valorar la capacidad funcional se van a medir los rangos o límites de movimiento articular a los que llega cada persona, para cada articulación o parte del cuerpo a evaluar.

Conocer los límites de movimiento articular de una persona nos permite evaluar el grado de discapacidad temporal o permanente que tiene una persona lesionada [2,3]. Como ya hemos comentado antes, esta valoración es de interés para médicos forenses, o en general para peritos judiciales, ya que proporciona una prueba basada en datos objetivos que indican una medida precisa del grado de discapacidad de una persona [4,5].

Un aspecto importante a considerar en la valoración de la capacidad funcional es lo relativo al grado de participación por parte del sujeto evaluado, no siendo fácil determinar el grado de sinceridad que muestra durante la realización de las pruebas. Consecuentemente es necesario acompañar los resultados con una medida del grado de colaboración, información relevante para determinar si la prueba es concluyente, esto es, si podemos estar o no frente a un posible "simulador".

La clasificación internacional de las enfermedades mentales (DSM)[6] define la simulación como: "la producción intencionada de síntomas físicos o psicológicos desproporcionados o falsos, motivados por incentivos externos". Esta definición no sirve para caracterizar a muchos pacientes debido a que comprobar una "falsedad" en los síntomas no resulta fácil.

Esto origina que algunos simuladores no resulten identificados. Existen diversas publicaciones donde se incluye una terminología y metodología específica para facilitar la clasificación de estas conductas sospechosas y poder determinar así si una persona simula[7].

En relación a la posible simulación por parte de un sujeto en las pruebas de valoración de la capacidad funcional, la utilización de técnicas de realidad virtual presenta claras ventajas frente a los sistemas de medida convencionales. Dichas técnicas permiten que el sujeto a valorar se introduzca en un entorno virtual donde carece de referencias físicas externas. La realización de acciones que se le presentan de forma sorpresiva en este contexto de aislamiento, favorece que el sujeto manifieste su verdadera capacidad funcional en la realización de los movimientos.

Una de las aplicaciones principales de la valoración de la capacidad funcional reside en determinar el grado de discapacidad que ha experimentado un sujeto como consecuencia de un accidente, enfermedad, u otros motivos, para establecer una compensación que permita resarcir al individuo de una manera justa. Generalmente, se trata de procedimientos judiciales que por su naturaleza necesitan satisfacer una serie de requisitos como la objetividad, la sencillez, la reproducibilidad y la evidencia.

La objetividad se obtiene mediante la obtención de datos a través de instrumentos de medida contrastados y certificados que evitan la interpretación en base a una observación cuestionable. La sencillez del sistema va a permitir medir, de forma no invasiva, la libertad de movimiento que el sujeto tiene en el desarrollo de su actividad diaria. El poder volver a reproducir una prueba en otro instante temporal, es otra de las características importantes.

2 ALCANCE

En este proyecto se exponen dos métodos para evaluar la capacidad funcional cervical y de hombros aplicando tecnologías de realidad virtual.

En la primera parte del proyecto se presenta el objetivo del proyecto y la necesidad de su desarrollo. También se expone el estado de la tecnología de realidad virtual en la actualidad así como los campos de investigación en los que se está aplicando.

Para cada uno de los mencionados métodos se va a explicar detalladamente tanto la instrumentación necesaria para llevar a cabo la captura del movimiento, como la metodología utilizada para dicha captura y su posterior análisis de datos.

Se analizan los métodos reales utilizados actualmente, comparándolos con los virtuales, suponiendo estos últimos, una herramienta complementaria en el caso de la evaluación de la capacidad del rango cervical y una alternativa al dispositivo físico "Move&Reach" desarrollado por el grupo IDERGO, en el caso de la evaluación de la capacidad de la columna cervical y hombros.

También se va a exponer la muestra de personas que se ha sometido a la prueba, comentando los detalles concretos de cada caso. La muestra incorpora un grupo de personas normales y un grupo de personas que presentan un rango de movilidad reducido en la región cervical. También se presenta una muestra de personas normales para el caso de la evaluación de la columna cervical y de hombros utilizando el dispositivo "Move&Reach".

Finalmente, se dedican varios apartados a discutir los resultados obtenidos en ambas pruebas, utilizando la realidad virtual. Se compararán los resultados obtenidos en las dos pruebas utilizando entornos virtuales, con los resultados obtenidos en las pruebas normales. A modo de conclusión, se comentan las posibilidades que tienen estos sistemas de realidad virtual dentro del marco general de la evaluación de la capacidad funcional donde se engloba y las posibles mejoras a tener en cuenta en un futuro.

Los métodos presentados se evaluarán partiendo de las ventajas que supone la incorporación de la realidad virtual a los métodos físicos de evaluación funcional utilizados actualmente. En el primer método, se someterá al sujeto a una prueba guiada dentro de un entorno virtual, para comprobar los rangos máximos de los movimientos cervicales. En el segundo método se tratará de conseguir un dispositivo virtual basado en un dispositivo real patentado por la Universidad de Zaragoza y utilizado para la evaluación de la capacidad funcional cervical y de hombros.

3 ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE NECESIDAD

El presente proyecto está incluido en el marco general de la evaluación de la capacidad funcional [8]. Concretamente está dirigido a la evaluación de la capacidad funcional cervical y de los hombros.

Este proyecto surge de la necesidad de aprovechar las ventajas que ofrecen las técnicas de realidad virtual para incorporarlas a la evaluación de la capacidad funcional, en este caso, a la región cervical y hombros. Con esta tecnología se pueden crear entornos inmersivos virtuales desarrollados por ordenador que permiten reproducir un escenario real en tres dimensiones sin necesidad de construirlo físicamente, con las importantes ventajas que esto supone.

Una de las grandes ventajas de trabajar con la realidad virtual es que las personas pierden cualquier referencia externa, lo que posibilita que posibles simuladores realicen unos movimientos acordes a su capacidad funcional real, obteniendo así unos resultados más ajustados a la realidad.

Este tipo de sujetos simuladores son particularmente comunes en el entorno de la medicina legal. Hay estudios que estiman que la incidencia de este tipo de sujetos en la población española es bastante alta, llegando incluso a porcentajes superiores al 50%, en el diagnóstico de esguinces cervicales y cardialgias críticas [9].

Se considera un dato excesivamente elevado y es posible que dependa también del profesional que debe decidir a diario si el paciente merece o no indemnizaciones, incapacidades temporales o permanentes, etc., y carece con frecuencia, de los medios para objetivar en lo posible la presencia de exageración de síntomas o simulación.

Los métodos virtuales aportan el grado de objetividad necesario para poder resolver estos casos dudosos de simulación. Son sistemas desarrollados exclusivamente por ordenador y mediante los cuales, se consiguen crear escenarios en tres dimensiones donde el sujeto a evaluar se ve sumergido.

Esta inmersión dentro de los escenarios virtuales, se consiguen mediante un dispositivo montado en la cabeza, (*HMD – "Head Mounted Display"*), que permite monitorizar los movimientos que realiza la persona en la escena virtual.

El proyecto aquí planteado supone un importante impulso en la valoración de la capacidad funcional, ya que mediante este entorno virtual en el cual la persona se ve sumergida, se pierde toda referencia externa y se obtienen medidas objetivas de los movimientos que pueden llegar a realizar la persona a evaluar.

4 ESTADO DE LA TÉCNICA

En este apartado nos vamos a centrar en el estado en que se encuentra la tecnología de realidad virtual, haciendo especial hincapié en el ámbito biomédico, ya que es el entorno donde se engloba el proyecto.

Comencemos definiendo la "**Realidad Virtual**", o VR ("Virtual Reality"), como la denominaremos en adelante. Esta se define como "el uso de simulaciones interactivas generadas mediante ordenador, para dar al usuario la oportunidad de interactuar con ambientes y escenarios que parecen estar y sentir de forma similar a los del mundo real".

En este sentido, la VR constituye una herramienta innovadora y potente, capaz de introducir al sujeto en entornos controlados y que ofrecen sensaciones muy realistas. En los últimos años este sector ha registrado un importante desarrollo que ha supuesto un incremento considerable en el número de sus aplicaciones así como de la calidad de las mismas.

Los sistemas de VR se clasifican generalmente por el grado de inmersión que presentan a los usuarios. Una inmersión total permitiría una interacción con el mundo virtual sin restricciones y nos ofrecería los mismos sentidos de la vida real (vista, oído, tacto, gusto y olfato). Generalmente, los sistemas actuales se centran en la vista y el oído fundamentalmente, aunque existen sistemas que incluyen el tacto mediante la incorporación de guantes de presiones. El motivo fundamental de centrarse en estos sentidos se basa en el alto coste de implementar todos los sentidos así como en la importancia que adquiere cada uno de ellos y su aplicabilidad en el proyecto a desarrollar.

En cuanto al grado de inmersión, cabe distinguir los siguientes tipos:

- **Realidad virtual inmersiva:** Consigue un grado de inmersión total mediante el uso de dispositivos como cascos y gafas de VR, sensores, posicionadores, etc. que consiguen aislar al sujeto del mundo real para transportarlo a un escenario diseñado para la ocasión. En este tipo de sistemas, la movilidad de la cabeza supone una variación de la perspectiva visual, dotando de gran realismo la interacción del sujeto con el mundo virtual.
- **Realidad virtual semiinmersiva:** Utiliza presentaciones tridimensionales a través de proyecciones estereoscópicas o pantallas, con una perspectiva visual fija.
- **Realidad virtual no inmersiva:** Presentaciones en dos dimensiones.

La utilización de estos sistemas de VR puede completarse con otras técnicas como pueden ser la fotogrametría o la incorporación de sensores inerciales para registrar la captura de movimiento del sujeto, proporcionando su aplicación a un mayor campo de investigación y creando grandes posibilidades y expectativas.

En la última década, la VR ha experimentado un auge importante adquiriendo un protagonismo muy relevante en disciplinas como psicología, medicina, diseño, formación.

Podemos ver aplicaciones de la realidad virtual en:

- Diagnóstico evaluativo de sujetos con problemas
 - ✓ Neurológicos
 - ✓ Musculoesqueléticos
 - ✓ Vestibulares.
- Programas de rehabilitación, especialmente como elemento de distracción al dolor.
- Formación en medicina y otras, mediante la simulación de intervenciones.
- Tratamiento de fobias como claustrofobia, aracnofobia, aerofobia...
- Diseño de producto, permitiendo una interacción del usuario con un producto virtual antes de fabricar una versión real del mismo.
- Entrenamiento en programas de pilotos, soldados, operadores de máquinas...
- Educación.
- Cine, juegos y entretenimiento en general.

La medicina, como puede observarse, es una de las áreas del conocimiento donde se ve reflejada la gran utilidad y las ventajas que supone el uso de sistemas de VR, llegando a ser tal su expansión que, a día de hoy, podemos encontrar un gran número de investigaciones al respecto enfocadas hacia muy diversas temáticas.

Como indicábamos al comienzo de este punto, nos centraremos en las diversas investigaciones aplicando VR que se han hecho en el entorno médico.

Una reciente revisión de la bibliografía relacionada nos permite tener una visión general de las líneas de investigación más relevantes en la actualidad, así como de la dirección en que se centran las futuras investigaciones. A continuación, y a título ilustrativo, se recogen algunas de las principales líneas de desarrollo reflejadas en las publicaciones científicas relacionadas con aplicaciones anteriormente mencionadas:

Utilización de entornos virtuales inmersivos como sistema para la evaluación del Rango de Movilidad Cervical con fines diagnósticos y de evaluación [10].

La aplicación desarrollada muestra, de forma sucesiva, una serie de insectos voladores al paciente y solicita que mediante movimientos cervicales, siga la trayectoria de los mismos y los rocíe con un spray para eliminarlos. Este movimiento es captado por sensores inerciales de movimiento y analizado posteriormente.

Se llevó a cabo el estudio sobre 25 voluntarios (16 mujeres y 9 hombres) con una edad media de 39.0 ± 12.7 aquejados de dolor cervical crónico así como 42 voluntarios (31 mujeres y 11 hombres) con una edad media de 35.3 ± 12.4 sin patología previa.

Los medios tecnológicos utilizados al efecto incluyeron un conjunto de sensores de movimiento modelo *Fastrak* de la marca comercial *Polhemus* así como un sistema VR inmersivo (*I-glasses HRV Pro* de la marca *Virtual Realities*). Mediante el software de creación

de videojuegos *Gamemaker Software* se diseñó un entorno virtual adecuado para el fin buscado así como un programa de recogida y análisis de los datos extraídos del estudio y basado en el software *Matlab*.

Utilización de sistemas de realidad virtual para el tratamiento y recuperación de la función motora de extremidades superiores reducida a causa de episodios de infarto cerebral [11].

La aplicación consta de una serie de escenarios virtuales de complejidad creciente encaminados al seguimiento de un recorrido con un objeto por parte del paciente.

Para su validación, el estudio fue realizado sobre un grupo de pacientes con diagnóstico de hemiparesis causada por un primer infarto cerebral en la región de la arteria cerebral media. El grupo a estudio estuvo bien equilibrado con respecto a género, edad, hemisferio afectado y grado de disfunción motora.

Durante las pruebas, los escenarios virtuales fueron proyectados sobre una pantalla con un proyector LCD de alta resolución y como sensores de movimiento se utilizaron los sensores Polhemus Liberty™. El software utilizado al efecto es un producto comercial previamente diseñado por una empresa externa para procesos de rehabilitación (VRRS® Virtual Reality Rehabilitation System. Khymeia Group. Noventa Padovana, Italy)

Utilización de sistemas de realidad virtual para la evaluación y mejora del rango de movilidad de la extremidad superior con una reducción en la sensación de dolor en pacientes con heridas por quemadura [12].

El escenario virtual utilizado en el estudio representa una escena invernal que permite al paciente lanzar bolas de nieve a los personajes que se le van apareciendo en la escena a lo largo de la prueba.

El estudio fue llevado a cabo sobre un grupo de 39 pacientes, todos ellos hombres, con una edad comprendida entre los 21-57 años y un porcentaje de daño por quemadura de entre el 3-60 %.

Como sistema inmersivo de VR se utilizaron unas gafas modelo Nvisor de la marca comercial Nvis así como un sistema de captura del movimiento, si bien acerca de este último no se detalla en el artículo la marca y modelo utilizados.

El escenario virtual utilizado durante la prueba fue diseñado por un miembro del propio equipo de trabajo si bien no se recoge el software utilizado para su diseño.

Desarrollo de sistemas de realidad virtual capaces de facilitar la interacción remota doctor-paciente con fines neurorehabilitadores [13].

Se expone el proceso de creación de un sistema integrado para telerehabilitación el cual permitiría la inmersión del paciente en una sala de rehabilitación virtual para, mediante el uso de agentes simuladores (ej. Brazos robotizados), llevar a cabo ejercicios encaminados a

la rehabilitación motora sin ser necesaria la presencia física del paciente en el propio hospital.

Los medios tecnológicos utilizados para tal fin constan de un conjunto de sensores de movimiento modelos 6-DOF Intersense IS-900 y Optitrack de Natural Point Inc. así como unas gafas de VR modelo NVISSX111.

Los entornos virtuales se diseñaron mediante el Sistema XVR (Tecchiaetal.,2010)

El personaje virtual destinado a representar al paciente se creó utilizando la librería HALCA (Gillies and Spanlang,2010) que permitió crear un avatar (hombre/mujer) compuesto por 123 huesos y articulaciones.

Utilidad de sistemas inmersivos de realidad virtual en la evaluación de la capacidad de navegación espacial en relación con la edad y enfermedad de Alzheimer [14].

Se plantea a los pacientes, gracias al uso de un sistema inmersivo de VR, el recorrer un itinerario dentro de una ciudad virtual durante dos veces, de manera consecutiva y tan rápido como les sea posible. Tras el recorrido se les plantea un test en que se pregunta por objetos presentes dentro del escenario y que el paciente debería recordar.

Para la evaluación del sistema se realizaron pruebas sobre un grupo poblacional compuesto por 8 adultos jóvenes, 7 adultos mayores sin patología mental diagnosticada y 2 pacientes con diagnóstico clínico de probable enfermedad de Alzheimer.

Como sensores de movimiento durante la prueba se utilizaron unos sensores modelo miniBird 800 de 6 grados de libertad de la empresa Ascension Technologies y un sistema de VR modelo Proview XL-50 (HMD) de Kaiser Electro-Optics Inc. Así como el software WorldUp Release 5 para el diseño de los escenarios virtuales.

Uso de sistemas inmersivos de realidad virtual como apoyo en terapia conductual cognitiva encaminada al tratamiento de trastornos de la alimentación [15].

Se plantea la utilización de sistemas inmersivos de VR en tratamientos destinados a lograr una percepción comparativa de la imagen real en confrontación con una imagen virtual creada por el propio paciente. El sistema desarrollado permite exponer a los pacientes a una serie de situaciones relacionadas con desordenes de la imagen corporal para aprender a encararlas de un modo adaptativo.

El sistema desarrollado fue testado sobre un grupo formado por 34 mujeres con diversos diagnósticos de anorexia y bulimia nerviosa y con edades comprendidas entre los 15-40 años de edad.

Como sistema inmersivo de VR se utilizaron unas gafas modelo V6 Virtual Research así como un conjunto de escenarios virtuales desarrollados por el propio grupo de investigación gracias al software WorldUp con Sense 8.

Inclusión de entornos educativos virtuales como método de apoyo al aprendizaje en alumnos con síndrome de Asperger [16].

El proyecto que aquí se describe plantea la inclusión de sistemas de VR en entornos educativos en los que, por necesidades específicas de los estudiantes, se haga necesario un estilo educativo adaptado. Se plantea así pues el uso de escenarios virtuales que representen aquellas situaciones en que el alumno pueda mostrar dificultades (aula de estudio, patio del colegio, zonas de interacción con otras personas, etc.) permitiéndoles una adaptación progresiva a las mismas y la adquisición de herramientas para llevarlo a cabo.

El sistema propuesto fue evaluado sobre un grupo de 20 estudiantes (16 niños y 4 niñas) con edades comprendidas entre los 8-15 años todos ellos diagnosticados de Síndrome de Asperger.

Se utilizó el sistema Kinect como sistema de detección del movimiento así como una pantalla Steward Aeroview model 100 y unas gafas Cristal Eyes Stereography glasses como sistema inmersivo de VR.

Los entornos virtuales utilizados en el proyecto fueron diseñados por el propio equipo mediante la aplicación de RV Vizard y los avatares mediante 3Dmax.

Utilización de sistemas de realidad virtual en el tratamiento de acrofobia [17].

En el artículo se intenta analizar la utilidad de un sistema de VR en el cual se representan una serie de escenarios encaminados a tratar la fobia a las alturas (azoteas, escaleras, edificios etc) y la comparación de la eficacia del mismo con respecto al tratamiento convencional sin exposición a VR.

El estudio fue realizado sobre 30 pacientes (18 hombres y 12 mujeres) con una edad promedio de 50.6 ± 9.67 años con una persistencia de la acrofobia de 33.5 ± 13.26 años.

Como sistema inmersivo de VR se utilizaron unas gafas modelo Cybermind Visette Pro capaces de representar los escenarios diseñados mediante el software Sense 8 WorldUp R4.

Como puede desprenderse de la bibliografía expuesta, la aplicabilidad de la VR sufre un constante crecimiento, aportando un valor añadido muy importante a las disciplinas en las que se incorpora.

El proyecto aquí planteado supone un importante impulso en la valoración de la capacidad funcional al incorporar la VR, midiendo de esta forma la verdadera pérdida de funcionalidad experimentada por una persona.

Conlleva una innovación importante en cuanto a que incorpora un software de análisis propio desarrollado específicamente para el proyecto. Así mismo, cuenta con el desarrollo propio de personajes sintéticos o avatares para ser integrado en sintonía con los distintos segmentos de población a analizar ajustándose a su antropometría y características, y desarrollo propio de escenarios que recrean el entorno donde desarrollar las actividades permitiendo una correcta integración entre el usuario y su entorno próximo.

Finalmente incorpora avanzada tecnología como la captura de movimiento (Mocap) en segmentos corporales a través de sensores inerciales y la recreación inmersiva mediante dispositivos HMD (Head Mounted Display).

5 INSTRUMENTACIÓN

5.1 SISTEMA "MOVE HUMAN-SENSORS"

El sistema "MoveHuman-Sensors" se basa en la **captura de movimiento** "*Motion Capture*", que en adelante denominaremos MoCap [18]. Esta captura consiste en recoger los movimientos que hace una persona mediante sensores inerciales, reproduciendo dichos movimientos con modelos virtuales de personas o avatares adecuados a las medidas antropológicas de cada persona, mediante un software de animación 3D.

La finalidad del Sistema "MoveHuman-Sensors" (en adelante MH-Sensors) es proporcionar un sistema de captura de movimiento portátil, que nos permita realizar posteriormente un análisis tridimensional del movimiento humano. En el caso que nos ocupa estaría enfocada al análisis y evaluación de la capacidad funcional de un sujeto, pero también se utiliza como herramienta para medir la evaluación de riesgos en el ámbito laboral [19,20].

Para capturar el movimiento, además de utilizar un conjunto de sensores inerciales que se fijan en ciertos puntos anatómicos, necesitamos un software de animación 3D. La combinación de ambos permiten trasladar el movimiento capturado a un modelo biomecánico, para posteriormente hacer un análisis preciso de los movimientos capturados.

5.1.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir para llevar a cabo el análisis de la Capacidad Funcional de un sujeto haciendo uso del sistema MH-Sensors se puede sintetizar en **3 fases**.

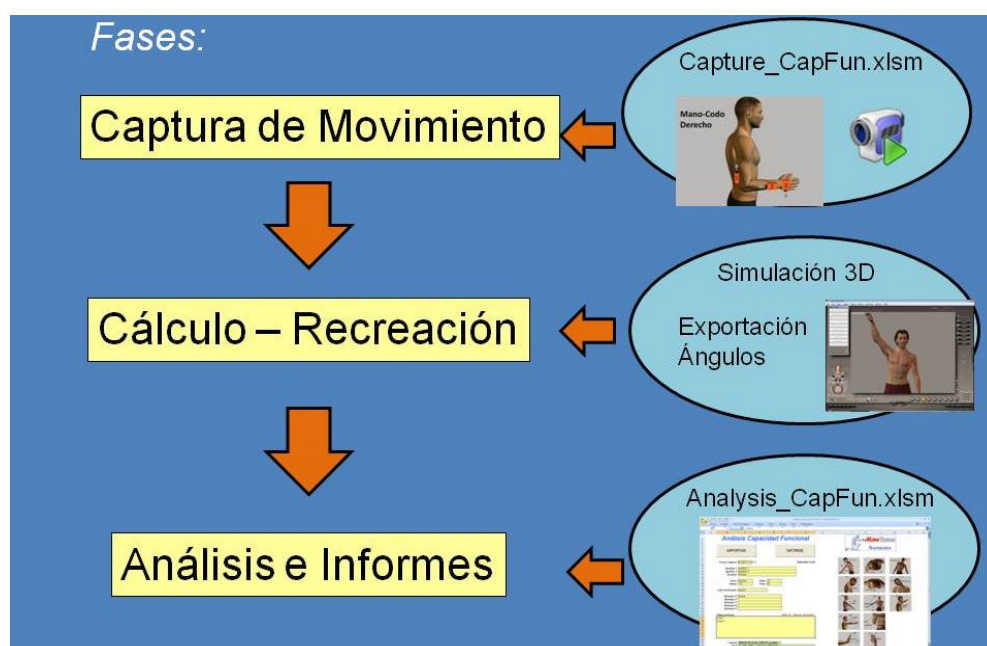


Fig 1. Fases del procedimiento de trabajo.

En la **1ª fase** se realiza la captura del movimiento propiamente dicha de cada uno de los movimientos articulares que se desea estudiar, siguiendo el procedimiento anteriormente descrito.

En la **2ª fase** se hará uso del software de simulación 3D donde, ejecutando ciertas funciones implementadas en dicho software, se procesarán los datos recogidos de los sensores con el fin de recrear el movimiento sobre un modelo biomecánico que se moverá como el sujeto observado [21,22].

A la vez, se realizarán los cálculos necesarios de ángulos y velocidades de los movimientos articulares capturados y se exportarán a ciertos ficheros para su tratamiento posterior en la siguiente fase.

En la **3ª fase** podremos analizar, por medio de una hoja Excel donde se importarán los ficheros generados en la fase anterior, los datos resultantes para valorar la capacidad del sujeto en relación a la normalidad de los movimientos articulares capturados, comparando serie 1ª y 2ª. Finalmente podremos generar un informe detallado de los resultados de la prueba en un formato pre-maquetado MS-Word en el cual podremos incluir las conclusiones del estudio.

5.1.2 SENSORES INERCIALES

Para medir la capacidad funcional en nuestro caso, es preciso disponer de 9 sensores inerciales. El equipo se complementa con una antena o "Dongle", capaz de transmitir de forma inalámbrica los datos de la captura permitiendo la comunicación entre los sensores y un ordenador portátil.

Para las pruebas de evaluación de la capacidad funcional cervical y de hombros se utilizan sensores inerciales inalámbricos de la marca Colibrí.



Fig 2. Sensores Colibrí y "Dongle" USB de comunicación.

Estos sensores irán sujetos al cuerpo del sujeto a evaluar, mediante un conjunto de fijaciones. Cada sensor se identifica mediante un número que determina la zona del cuerpo sobre la que deberá ir colocado. Los sensores numerados se colocan siguiendo la siguiente secuencia: Pelvis -> 1, Tórax -> 2, Cabeza -> 3, Brazo derecho -> 4, Antebrazo derecho -> 5, Brazo izquierdo -> 6, Antebrazo izquierdo -> 7, Mano derecha -> 8, Mano izquierda -> 9.

En el Anexo I se incluyen las imágenes del conjunto de fijaciones necesarias para anclar los sensores al cuerpo del sujeto. Además de esto, también se detalla en este anexo, el equipo complementario necesario para la captura de movimiento.

5.1.3 AVATARES

Los modelos virtuales o avatares que parecen imitar los movimientos y los gestos de los seres humanos se han desarrollado con un software de diseño 3D basándose en la **técnica de animación esquelética** [23,24].

Esta técnica de animación utiliza un personaje sintético representado por dos partes, una representación superficial usada para dibujar al personaje, llamada la piel, y una construcción jerárquica de huesos que es la base de la animación, llamada el esqueleto.

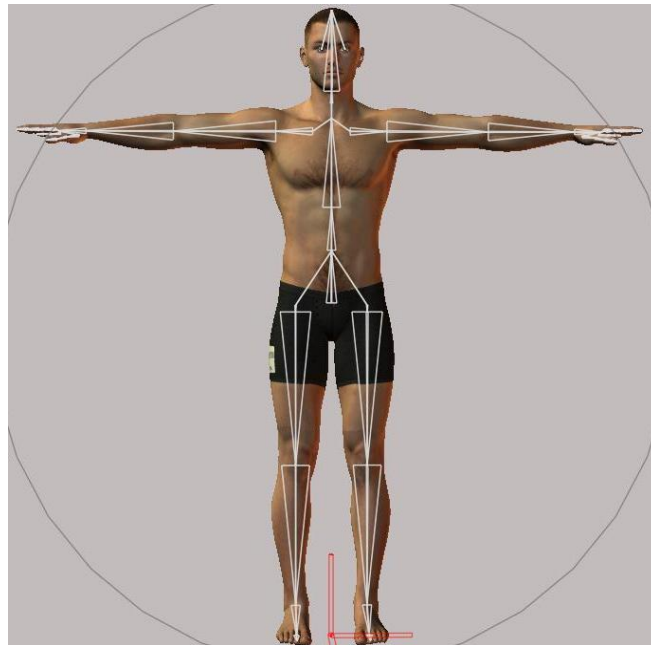


Fig 3. *Modelo esquelético.*

Intuitivamente podemos pensar que la definición de un esqueleto de un personaje virtual es similar a nuestro propio esqueleto, donde la estructura jerárquica implica que cada hueso tiene uno o más huesos hijos y al mover un hueso padre se mueven los correspondientes huesos hijos. A su vez, cada hueso tiene una piel asociada que le rodea dándole un aspecto visual casi real.

Cuando movemos un personaje, lo que movemos realmente son los huesos o segmentos corporales y la piel sigue el movimiento de cada parte asociada. Asimismo, la piel de la zona próxima a las articulaciones - pensemos en la rodilla o en un codo - se deforma siguiendo algoritmos específicos que incorporan los software de animación actuales, ofreciendo una visión del movimiento muy realista.

5.1.4 CONSIDERACIONES

Al utilizar unos sensores inerciales habrá que tener en cuenta una serie de consideraciones importantes.

La **orientación** de los sensores, se hará en base al propio eje X que aparece indicado sobre la superficie del sensor y que en la imagen se identifica con una flecha de color rojo. La correcta colocación de los sensores en cada una de las partes del cuerpo es muy importante y en el Anexo II se muestra como debe ser la orientación de los sensores para cada parte.

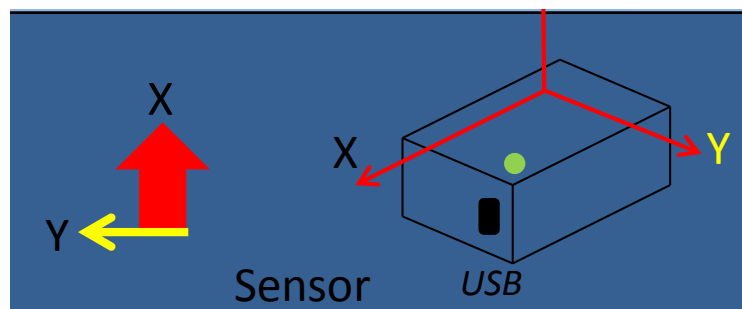


Fig 4. Orientación magnética de los sensores (eje x).

También será de gran importancia comprobar la correcta **alineación** de los sensores una vez han sido fijados. En el Anexo II también se indica mediante unas fotos, como deberían estar colocadas estas fijaciones en el cuerpo.

La otra consideración para nuestro sistema, es asegurar que el sensor asociado a cada parte del cuerpo, permanezca perfectamente solidario a esa parte del cuerpo y durante todo el tiempo de la captura, con el fin de obtener resultados satisfactorios. Asimismo, es también clave, ubicar cada sensor en aquella zona donde la influencia del movimiento propio de la musculatura durante el movimiento no influya muy nocivamente en la calidad del movimiento resultante.

5.2 DISPOSITIVOS HMD

Los dispositivos visuales HMD son los dispositivos que se utilizan para ver los entornos de VR, de modo que la persona está totalmente inmersa en la escena virtual.

Para nuestra evaluación hemos utilizado dos modelos de los muchos que existen en el mercado.

5.2.1 GAFAS DE REALIDAD VIRTUAL OCULUS

Con este modelo de gafas podemos ver entornos virtuales en tres dimensiones con un gran efecto de inmersión, ya que las gafas nos aíslan del medio exterior para que parezca que estamos dentro de la escena.



Fig 5. *Modelo de gafas de VR OCULUS.*

Con este dispositivo HMD podemos capturar los movimientos de la cabeza con el propio sensor que lleva integrado o bien poner un sensor de mayor fiabilidad encima del dispositivo. En nuestro caso se ha optado por la segunda opción ya que da resultados más fiables.

Como se puede ver en las imágenes de abajo, la persona tiene una visión binocular.



Fig 6. *Visión binocular con las gafas OCULUS.*

5.2.2 GAFAS DE REALIDAD VIRTUAL VUZIX

Con este modelo de gafas tenemos visión estereoscópica y podemos ver entornos virtuales en dos y tres dimensiones.

Hay que decir que estas gafas no consiguen un efecto de inmersión tan bueno como con las de la marca OCULUS, sin embargo sí que tienen una calidad de pixel mejor.

Con este dispositivo HMD también hemos utilizado nuestro propio sensor por dar mejores resultados. Este dispositivo tiene la ventaja de que al ser más compacto y pequeño que las OCULUS, puede colocarse directamente en el interior de nuestras gafas de protección UVEX.

Como vemos en la imagen, se pueden regular las pantallas según nuestra distancia pupilar y también se puede regular el número de dioptrías.

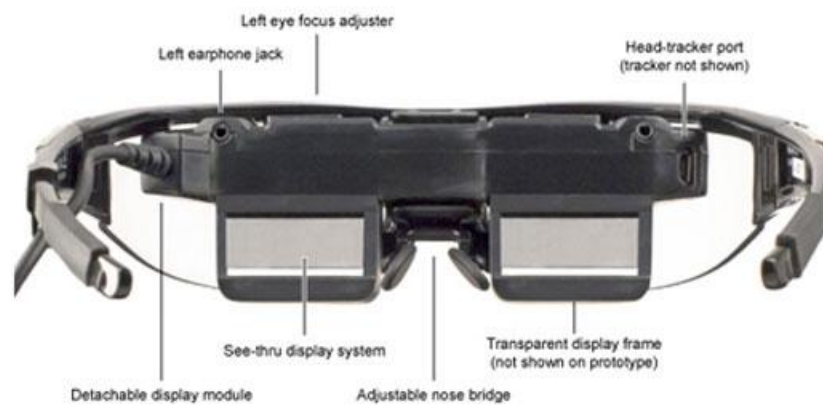


Fig 7. Modelo de gafas de VR VUZIX.

5.3 DISPOSITIVO M&R FÍSICO

A continuación se describe el Dispositivo físico denominado "*Move&Reach*", patentado por la Universidad de Zaragoza y diseñado para la evaluación de la capacidad funcional [25].

Este dispositivo nos ha servido de base para la versión M&R virtual desarrollada en este proyecto. El dispositivo consta de cuatro torres verticales formadas cada una por un conjunto de elementos con los que interactuará el sujeto mediante el desplazamiento de unos botes. El movimiento se realizará de forma alterna con ambas manos siguiendo la secuencia de encendido de los indicadores luminosos "LEDs". Cada torre consta de 10 bandejas cada una de las cuales dispone de un indicador luminoso en su parte frontal.

Las torres se disponen sobre una estructura extendida sobre el suelo y están arriostradas superiormente con el fin de estabilizar la estructura. Las torres centrales tienen una posición fija y las torres laterales pueden desplazarse sobre el carril inferior para ajustarse al percentil del sujeto a evaluar. Se consideran tres percentiles 05, 50 y 95.

El dispositivo se acompaña de un asiento regulable en altura y con tres posiciones de proximidad al dispositivo en función del percentil del sujeto. Con el fin de facilitar esta posición de proximidad de la silla respecto al dispositivo, se acompaña al conjunto de una plantilla que, colocada sobre el suelo, identifica las posibles distancias entre silla y dispositivo.



Fig 8. *Dispositivo M&R con plantilla en el suelo.*

En el Anexo III, se pueden ver en detalle las tres posiciones de configuración del dispositivo, el equipo electrónico que lo comanda y los complementos que se utilizan para reducir la visión del sujeto en la realización de la prueba.

También se explica en este anexo, el orden de las torres del dispositivo y la numeración de las diferentes bandejas que contienen los LEDs.

6 MUESTRA

6.1 EXPLORACIÓN MÉDICA Y CONSENTIMIENTO INFORMADO

La muestra de personas que se han sometido a este estudio las podemos clasificar dentro de dos grupos: personas con capacidad reducida, que se han analizado en el Instituto de Medicina Legal de Aragón (IMLA) y por otro lado, personas normales, que han querido participar voluntariamente en la base de normalidad de la Universidad de Zaragoza.

Todas las personas que han participado en el estudio han sido exploradas por un médico forense. Esta exploración ha sido previa a la realización de la prueba, para identificar si existe algún tipo de patología. Para el caso de la muestra normal, una persona que tuviera una patología que afectara a los movimientos a analizar, no se incluiría en la base de normalidad. Para el caso de personas analizadas en el IMLA, la exploración tiene como objetivo saber cómo está el sujeto antes de realizar la prueba, ya que si tiene reducida la capacidad de algún movimiento, deberá reflejarse en la prueba.

Para todos los sujetos se dispone de un consentimiento informado que tiene como objetivo que la persona reciba la información correcta y suficiente para que pueda evaluar y juzgar si quiere o no someterse a la realización de las pruebas, ya que es de carácter voluntario. Firmando la hoja de Consentimiento Informado, el sujeto acepta su participación en la prueba.

Dentro del mismo se le indica brevemente en qué consiste el estudio, indicando que se le colocaran una serie de sensores y que se trata de una prueba indolora sin riesgos para la salud.

También se indica que el estudio que va a realizar se ajusta a lo dispuesto en la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre de protección de datos de carácter personal.

6.2 MUESTRA DE PERSONAS NORMALES

Todas las personas que se engloban dentro de esta muestra son personas de diversas edades que se han presentado voluntariamente. Lo más importante de esta muestra es que son personas con la capacidad funcional para realizar movimientos cervicales totalmente dentro de la normalidad.

Tendremos una muestra diferente según la prueba a estudiar, de manera que para la evaluación de la columna cervical hay una muestra total de 18 personas de las cuales 11 eran mujeres y 7 hombres. La edad de la muestra tomada está comprendida entre los 18 y los 29 años.

La muestra total de personas que se ha sometido a la prueba con el dispositivo M&R, para la evaluación de la columna cervical y hombros, ha sido de 8 personas. De estas, 3 eran mujeres y 5 hombres. La edad de la muestra está comprendida entre los 21 y los 45 años.

Con este conjunto de personas podremos analizar las diferencias de los valores que se alcanzan, utilizando la prueba normal o la virtual. Además, con los resultados de capacidad obtenidos por esta muestra, podremos hacer la base de normalidad de la Universidad de Zaragoza, que nos servirá para establecer el porcentaje de capacidad funcional de un sujeto.

6.3 MUESTRA DE SUJETOS CON DISCAPACIDADES (IMLA)

Todos los sujetos englobados aquí, son casos de personas que están dentro de un procedimiento judicial y se van a evaluar en el Instituto de Medicina Legal de Aragón.

Estos sujetos se identifican con un número relacionado con el procedimiento judicial en el que están. Son sujetos que han sufrido un latigazo cervical a consecuencia de un accidente de tráfico en la ciudad.

Todos ellos son explorados por los médicos forenses en una primera cita, para luego someterse a las pruebas de evaluación de la capacidad funcional en la segunda.

De todos ellos se recogen las dolencias y vértigos que padecen, así como antecedentes o intervenciones quirúrgicas que hayan podido tener. Todo ello se hace para saber cómo estaba el sujeto antes del accidente en cuestión, ya que podría tener reducida la capacidad de algún movimiento, antes de haber sufrido el latigazo.

Únicamente vamos a estudiar los datos obtenidos de una muestra de cinco personas, aunque será suficiente para explicar los tres casos posibles que nos podemos encontrar.

7 PRUEBAS

7.1 PRUEBA DEL RANGO DE LA COLUMNA CERVICAL

7.1.1 PROCEDIMIENTO

7.1.1.1 Prueba normal de rango cervical

Esta prueba se realiza con el propósito de valorar la capacidad funcional de la columna cervical. En ella, se trata de objetivar alteraciones de la movilidad articular del sujeto. En concreto se valorará su capacidad funcional en relación a la normalidad.

El método utilizado para el estudio está basado en la captura del movimiento con el sistema MH-Sensors que se ha explicado anteriormente en el apartado de Instrumentación. En este caso, dicho sistema permite monitorizar y registrar el movimiento de la cabeza, dando la información necesaria para conocer el rango de movilidad de la columna cervical.

En esta prueba, que denominaremos normal o real, la valoración se fundamenta en el estudio de los ángulos y velocidades angulares alcanzadas al realizar los movimientos puros de la cabeza. Para ello, para cada movimiento característico, se han realizado dos series separadas entre sí por un periodo de descanso. Cada serie de movimientos se ha filmado y capturado durante 30 segundos, indicando al sujeto que procurase mantener una velocidad de movimiento uniforme y tratara de llegar al máximo de amplitud articular posible en cada ciclo de movimiento, pero sin que llegase a tener un dolor significativo durante la prueba.

A partir de los datos registrados de la prueba se analiza la capacidad en tanto por ciento, que el sujeto tiene para realizar los movimientos cervicales de flexo-extensión, rotación y lateralización. Para ello se toman los valores máximos de los ángulos alcanzados de cada movimiento para cada una de las dos series y se comparan con los valores de normalidad.

7.1.1.2 Prueba virtual de rango cervical

En esta prueba nos hemos centrado en el análisis de la capacidad funcional cervical mediante el uso de VR, pero teniendo en cuenta que supone un complemento de la anterior, ya que nos confirma los valores máximos de movilidad que puede conseguir la persona. Estos valores máximos se han analizado en la prueba normal de rango cervical, junto con los rangos máximos de los movimientos cervicales: rango de flexo-extensión, rango de rotación y rango de lateralización.

El método utilizado para el estudio está basado en la utilización de dispositivos HMD, combinado con el sistema de captura del movimiento ya citado MH-Sensors. El usuario, por medio del dispositivo HMD, se sumerge en un escenario que se mueve en respuesta a los movimientos realizados con su cabeza, como si estuviera realmente dentro de la propia escena.

En posición de sentado, al sujeto se le indica que siga con la vista ciertos objetos que se mueven en la escena, lo que le exige realizar movimientos de gran amplitud de la columna cervical para mantener la visión en todo momento, de dichos objetos; ello nos permite monitorizar y registrar rangos de movilidad del sujeto realmente funcionales.

La duración de la prueba es corta, en torno a 1 minuto de duración, pero a la vez intensa y motivadora, procurando aprovechar en lo posible el factor sorpresa. Después de un tiempo de descanso, se repite una segunda vez, pero modificando el escenario y las trayectorias de los objetos que se mueven, tratando que, al combinar ambas series, el rango de movilidad exigido sea el máximo posible, dentro ángulos de movimientos funcionales para la columna cervical. Durante el desarrollo de la prueba se registran los movimientos cervicales con el fin de conocer los ángulos y los rangos máximos de flexo-extensión, lateralización y rotación.

Ahora se va a explicar en detalle la metodología seguida para el desarrollo de los entornos virtuales. Como ya hemos dicho se utilizan dos escenarios diferentes, pero con geometrías y características similares. Se utilizan dos escenarios diferentes para aumentar el factor sorpresivo y que así el sujeto no sea capaz de memorizar las trayectorias que se siguen. En las siguientes imágenes se muestran ambos escenarios:

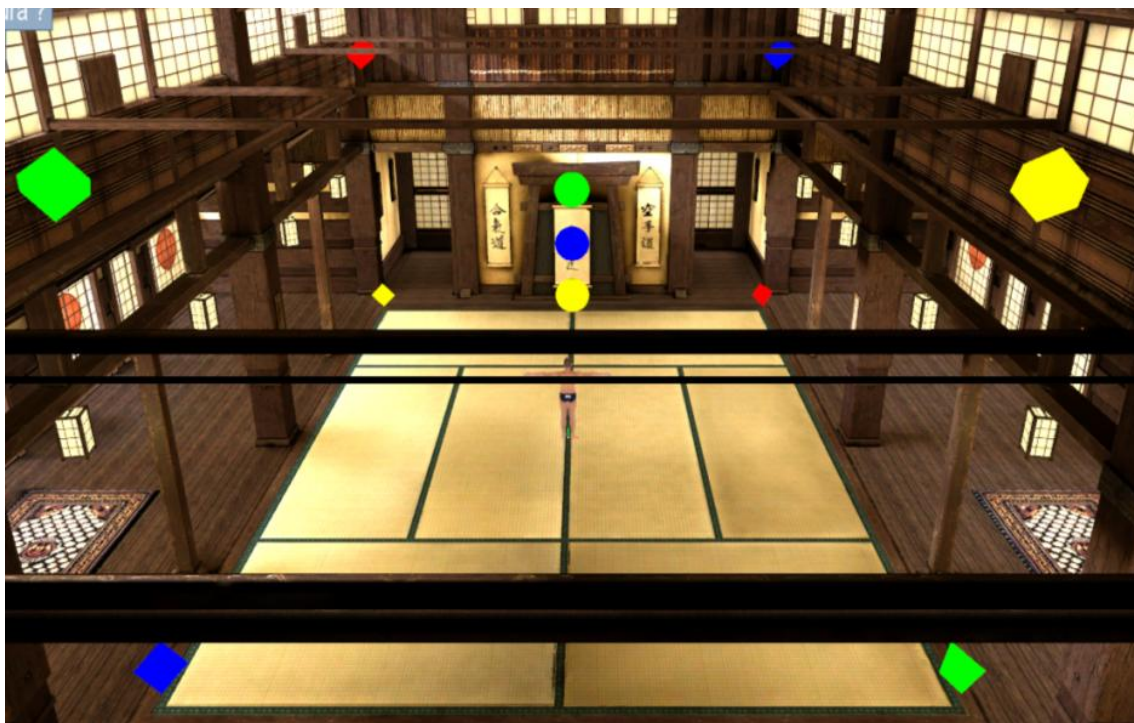


Fig 9. *Escenario primero para la evaluación de la capacidad funcional cervical.*



Fig 10. *Escenario segundo para la evaluación de la capacidad funcional cervical.*

Para la evaluación de la capacidad funcional cervical se introducen en los dos escenarios, una serie de formas básicas como las que se muestran en la tabla:

Cubo	Pirámide	Esfera
		

Fig 11. *Formas básicas que aparecen en los escenarios.*

Como vemos, se utilizan tres formas básicas en los escenarios : un cubo, una pirámide y una esfera. Los cubos y las pirámides están fijos en la escena y rotan sobre su propio eje. Las esferas aparecen estáticas hasta que el operador las active, en ese momento empezarán a moverse siguiendo unas trayectorias que guían al sujeto en el movimiento de la cabeza.

Las dimensiones, colores y formas de estas formas pueden modificarse dentro del propio desarrollo del software. También se puede modificar la velocidad con la que se mueve la esfera, de modo que le cueste más o menos tiempo realizar la trayectoria.

El cubo y la pirámide que vemos son de color azul y rojo pero también los hay de otros colores. Son elementos fijos dentro de la escena y están situados en las esquinas de la escena. El sujeto a evaluar deberá identificar estos elementos que siempre están en el mismo sitio.

La esfera es de color verde pero también hay una de color azul y otra de color amarillo. Estos colores se corresponden respectivamente con la primera, segunda y tercera trayectoria. Estos elementos se mueven en la escena siguiendo las trayectorias y las activara el propio operador, activándose con la tecla 1 la esfera verde, con la tecla 2 la esfera azul y con la tecla 3 la esfera amarilla. Estas trayectorias guían al sujeto en los diferentes movimientos que debe realizar, para evaluar su capacidad.

Para situar las diferentes formas dentro de la escena se ha creado un espacio con unas coordenadas estudiadas para alcanzar todos los movimientos puros cervicales. Los ejes de coordenadas y los niveles son iguales para ambos escenarios.

En el Anexo IV, se explica en detalle el sistema de coordenadas y los cuatro niveles de coordenadas que se han utilizado para crear el espacio donde situamos los objetos. Para posicionar las formas que permanecen fijas, utilizaremos las mismas coordenadas para ambos escenarios pero para dibujar las trayectorias serán diferentes trayectorias según la escena. Estas coordenadas también se detallan en este anexo, para cada escenario.

7.1.2 MOVIMIENTOS ESTUDIADOS

7.1.2.1 *Prueba normal de rango cervical*

Los movimientos que se analizan en esta prueba son los siguientes:

- **Flexo-extensión cervical.** Corresponde al movimiento de la cabeza en el plano sagital. La flexión es un movimiento hacia adelante desde la posición neutra de la cabeza y la extensión un movimiento hacia atrás desde esa misma posición.
- **Rotación cervical.** Corresponde a una rotación en un eje vertical al suelo o plano horizontal. Tendremos rotación hacia la derecha y hacia la izquierda.
- **Inclinación lateral.** Corresponde a un movimiento en el plano frontal. Tendremos lateralización derecha e izquierda.

A partir de estos movimientos se calculan los siguientes rangos:

- **Rango de Flexo-extensión.** Es el movimiento completo en el plano sagital y se corresponde con la suma en valor absoluto de los ángulos máximos alcanzados de flexión y extensión.
- **Rango de Rotación.** Es el movimiento completo en el plano horizontal y se corresponde con la suma en valor absoluto de los ángulos máximos alcanzados de rotación a la derecha y a la izquierda.
- **Rango de Lateralización.** Es el movimiento completo en el plano frontal y se corresponde con la suma en valor absoluto de los ángulos máximos alcanzados de lateralización a la derecha y a la izquierda.

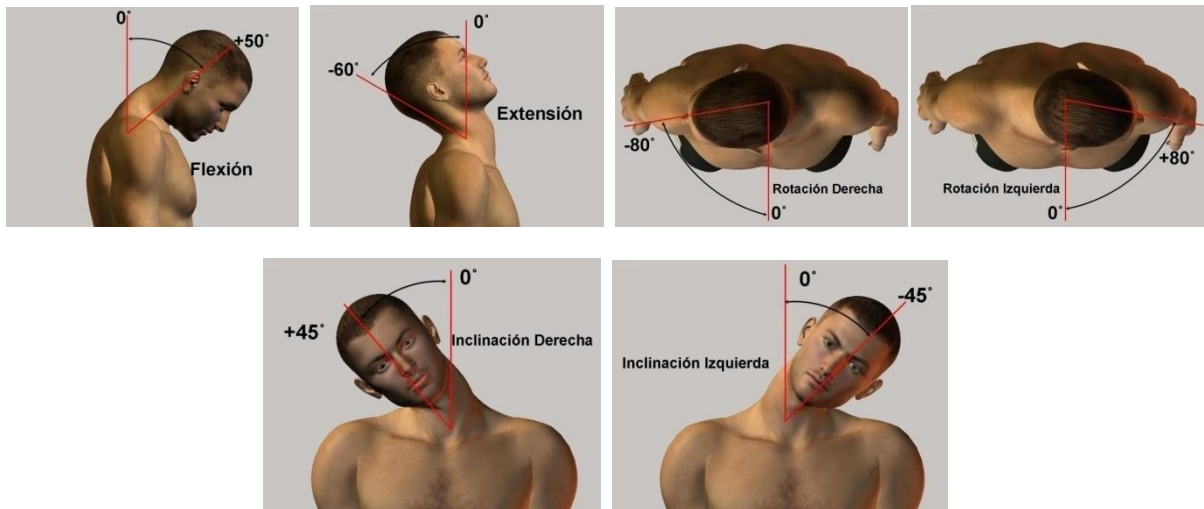


Fig 12. Ángulos analizados en la columna cervical.

7.1.2.2 Prueba virtual de rango cervical

En esta prueba, se analizan también los tres movimientos cervicales de flexo-extensión, rotación y lateralización que el usuario alcanza, cuando sigue las trayectorias ya vistas.

A continuación, veremos las tres trayectorias que siguen las esferas de colores para la primera escena y que servirán para guiar al sujeto, de modo que realice los movimientos cervicales a analizar. En el Anexo IV se muestra el detalle de cada una de las trayectorias que siguen las esferas.

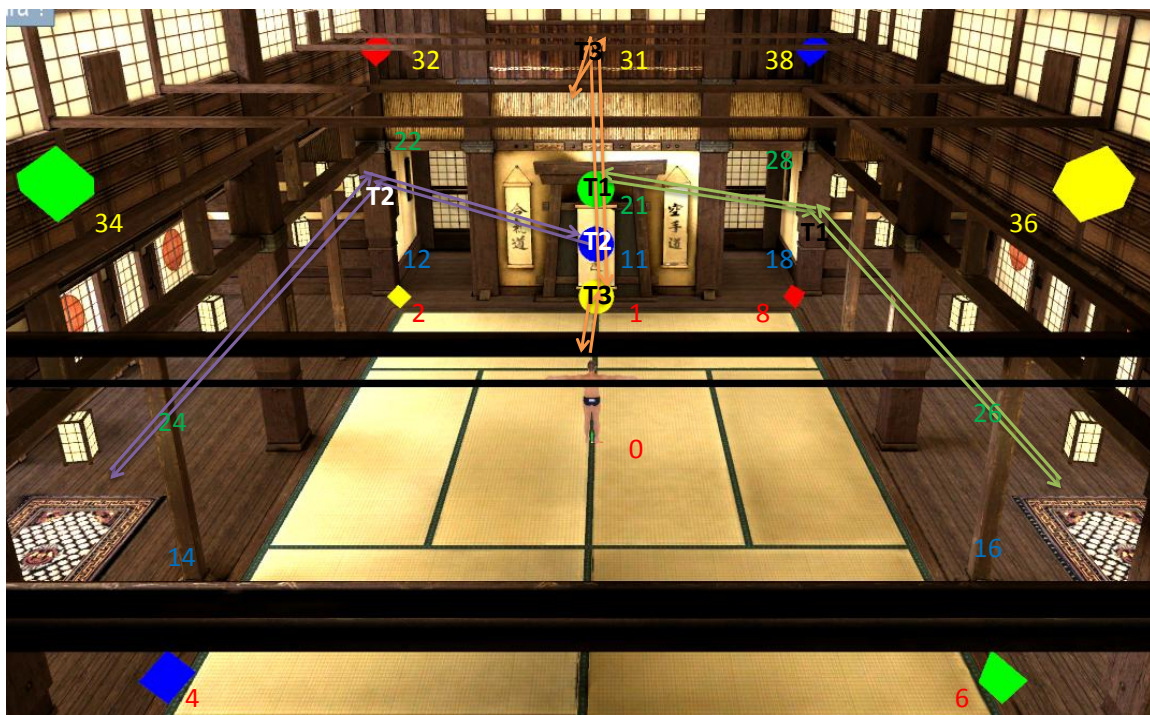


Fig 13. Conjunto de trayectorias de la primera escena.

En las tres trayectorias, se intenta conseguir una gran amplitud en los rangos cervicales. Reproduciendo la captura de movimiento con la aplicación, podemos ver el momento exacto en el que alcanzó los ángulos máximos de cada movimiento.



Fig 14. Ángulo de extensión máximo alcanzado por la persona en la prueba.

Ahora pasaremos a analizar las trayectorias que el sujeto va a tener que seguir en el segundo escenario. También se detallan cada una de estas trayectorias en el Anexo IV.



Fig 15. Conjunto de trayectorias de la segunda escena.

7.1.3 DATOS OBTENIDOS

7.1.3.1 Prueba normal de rango cervical

Los datos de los ángulos recogidos por los sensores hay que importarlos en unas hojas Excel diseñadas para obtener automáticamente aquellos datos de máximos que buscamos de la captura, para poder analizarlos. Deberemos seleccionar la serie y la parte del cuerpo que queremos analizar, que en nuestro caso será la cabeza.

Para cada uno de los movimientos antes citados, se han capturado dos series de movimiento de una duración de 30 segundos cada una, a una frecuencia de 25 registros por segundo.

El análisis de esos datos registrados será la base para la valoración de la movilidad articular cervical del sujeto a estudio. En concreto nos será útil observar los valores máximos alcanzados durante la prueba.

En el Anexo V se explican los gráficos que analizamos con la hoja Excel cuando tengamos importados los datos registrados durante la captura. Dentro este también podemos ver la tabla resumen de la hoja Excel de análisis donde se recogen los valores máximos alcanzados durante la prueba para todos los movimientos cervicales así como sus respectivos rangos de flexo-extensión, rotación y lateralización. Se puede ver un ejemplo a continuación:

CERVICAL						
Serie 1		Serie 2		Promedio Global	Maximo	
Ang	CV	Ang	CV	Ang	Ang	
Flexión:	71,3	6%	70,0	3%	70,7	75,9
Extensión:	50,9	6%	49,2	11%	50,1	55,4
Rango Flex-Ext:	122,2	-	119,2	-	120,7	131,3

Fig 16. Ejemplo de valores máximos y rangos registrados en la prueba.

Por otra parte, será importante hablar de que criterios seguimos para valorar la capacidad de cada uno de los movimientos capturados. Estos criterios cambiarán de la prueba normal de rango cervical a la prueba virtual cervical, ya que para esta segunda no dispondremos de una muestra de personas lo suficientemente grande como para establecer una normalidad.

En esta primera prueba, la valoración de la capacidad de una persona la obtenemos comparando los resultados de la prueba del sujeto a estudio con los datos de normalidad obtenidos de una muestra de personas sanas que previamente han realizado esta misma prueba.

En el Anexo V se presentan los gráficos con los percentiles que utilizaremos para dar una medida de la capacidad del sujeto respecto al conjunto de la muestra de personas sanas analizadas con este sistema (base de la normalidad). También se mostrarán en este anexo, la tabla de valoración que se utiliza para establecer el nivel de capacidad que se sugiere en función del percentil asignado y un ejemplo de la tabla resumen de capacidad funcional que se obtiene tras importar los datos de la captura en la hoja Excel de Análisis, explicando brevemente los parámetros utilizados en la tabla.

7.1.3.2 Prueba virtual de rango cervical

La prueba virtual se realiza una vez para cada escenario de los descritos anteriormente, dando lugar a dos series de movimientos que denominaremos Serie 1 y Serie 2. El análisis de los resultados de dichas series, constituyen la base de la valoración funcional.

Durante la realización de cada prueba se capturan los movimientos del sujeto, a una frecuencia de 25 registros por segundo, y se registran los valores angulares de dichos segmentos corporales. Un procesamiento de datos posterior nos permite conocer los valores máximos de esos ángulos, así como el rango completo de cada movimiento analizado en cada una de las series.

El resultado son unas tablas como las que aparecen en el Anexo VI, donde se pueden consultar los valores máximos alcanzados, que ya hemos indicado, de cada uno de los ángulos de flexión-extensión (Rx), rotación (Ry) y lateralización (Rz), tanto para la 1ª serie como para la 2ª serie. También se puede ver la diferencia de valores entre ambas series, así como los rangos resultantes en cada serie y su diferencia como se observa en el ejemplo.

		Serie 1	Serie 2	Serie 2-1	Rango.S1	Rango.S2	Dif.Rango
Cabeza.Rx	<u>Flex.</u>	48.1	51.5	3.4	109.6	103.9	-5.7
	<u>Ext.</u>	-61.5	-52.5	-9.1			

Fig 17. Ejemplo de los valores máximos de flexo-extensión que se registran.

En este anexo también se adjunta el análisis de la distribución de frecuencias de los ángulos de movilidad alcanzados en los movimientos de la espalda y la cabeza. Dichos gráficos nos permitirán analizar el porcentaje de veces que el valor de un determinado ángulo se ha situado en ciertos intervalos predefinidos, durante la realización de ambas series.

Dentro de la hoja de análisis, también podemos observar cada uno de los instantes de la captura que tenemos, analizando cada uno de los movimientos en ese instante y viendo los ángulos que se alcanzan. En el anexo VI se adjunta un ejemplo.

7.1.4 TRATAMIENTO DE DATOS

7.1.4.1 Muestra de personas normales

De los datos obtenidos con la Hoja Excel de Análisis para la muestra de personas normales, se han cogido los valores de los ángulos y rangos máximos en ambas series, de cada uno de los movimientos cervicales: flexo-extensión, lateralización y rotación. Se ha hecho esto tanto para la prueba normal del rango cervical como para la prueba virtual y el resultado son unas tablas como las que se muestran en el Anexo VIII.

Para comparar los valores de rangos máximos obtenidos por la muestra en la prueba virtual con los obtenidos en la prueba normal, se ha utilizado una fórmula que muestra lo que se parecen o diferencian los valores de rango obtenidos en ambas pruebas. Lo podemos ver con el siguiente ejemplo:

Una persona de la muestra normal ha conseguido un valor de rango máximo de rotación de 171.19 grados en la prueba virtual, mientras que en la prueba normal ha obtenido un rango máximo de rotación de 168.66 grados. Introduciendo estos valores en la fórmula nos daría un porcentaje, que muestra la similitud de los valores obtenidos entre ambas pruebas:

$$\frac{\text{VIRTUAL}}{\text{REAL}} (\%) = \frac{171.19}{168.66} \times 100 = 102\%$$

Un porcentaje cercano al 100%, como el obtenido en el ejemplo, indicaría que los valores de rango máximo obtenidos en la prueba normal y en la prueba virtual son muy semejantes.

En el Anexo VII se incluye una tabla en la que se muestra la comparativa de los resultados obtenidos en ambas pruebas, mostrando el porcentaje que ha obtenido cada individuo de la muestra normal, con la fórmula que hemos visto. A continuación se muestra un ejemplo:

ID	Rango máx FLEX-EXT			Rango máx LAT			Rango máx ROT		
	REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)	REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)	REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)
3001	140,79	127,03	90%	101,46	53,86	53%	170,51	182,12	107%
3002	158,14	138,02	87%	104,52	62,68	60%	187,27	186,35	100%

Fig 18. Comparación de valores obtenidos con ambas pruebas por la muestra normal.

7.1.4.2 Muestra de sujetos del IMLA

A parte del análisis de similitud, que nos mostrará si en la prueba virtual se alcanzan rangos parecidos o diferentes a los obtenidos en la prueba normal, tendremos que ver si la prueba virtual sirve como función complementaria para determinar si una persona está simulando.

En el Anexo VIII se muestran las tablas de los rangos máximos obtenidos al realizar la prueba normal y la virtual, por la muestra de sujetos pertenecientes al IMLA, para cada uno de los tres movimientos cervicales analizados.

La primera tabla corresponde a los datos obtenidos de la muestra en la prueba normal de rango de columna cervical y la segunda tabla corresponde a los datos obtenidos en la prueba virtual cervical. La tercera tabla muestra la comparativa de los resultados obtenidos en ambas pruebas y el porcentaje que se obtiene de la fórmula presentada anteriormente, como resultado de dividir los datos obtenidos de la prueba virtual entre los obtenidos en la prueba normal,

Esta última tabla servirá para clasificar a la persona como normal, si su capacidad está dentro de la normalidad, como discapacitada, si su capacidad está reducida en algún movimiento, o simuladora, si la persona está simulando una reducción de la capacidad. En la tabla adjuntada en el Anexo VIII se clasifica la muestra según estas tres situaciones, de modo que cada tipo se pinta con un color de fondo diferente, como se puede ver en la siguiente imagen: rojo para discapacidad, verde para normalidad y azul para simulación.

Rango máx ROT			
REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)	
130,13	173,77	134%	SIMULACIÓN
118,74	121,94	103%	DISCAPACIDAD
130,83	115,78	88%	DISCAPACIDAD
131,71	108,27	82%	DISCAPACIDAD
164,42	174,85	106%	NORMALIDAD

Fig 19. Ejemplo de la clasificación de la muestra según los datos obtenidos.

7.2 PRUEBA DE CAMPIMETRÍA FUNCIONAL CON EL DISPOSITIVO M&R

7.2.1 PROCEDIMIENTO

7.2.1.1 Dispositivo físico M&R

La prueba de evaluación de la capacidad funcional cervical y de hombros es una prueba de "campimetría funcional". Se trata de valorar la capacidad funcional de la columna cervical y hombros de un sujeto con un dispositivo, mientras trata de alcanzar y mover un objeto entre posiciones predefinidas y funcionalmente accesibles, realizando para ello movimientos naturales desde la posición de sentado.

Es una prueba que facilita objetivar posibles alteraciones de la movilidad articular del sujeto a estudio. En concreto permitirá valorar la capacidad funcional de la zona cervical y del hombro en relación a la normalidad.

En la prueba se utiliza el dispositivo M&R visto en el apartado de Instrumentación. Como veíamos, según la altura de la persona se modifica su asiento y el dispositivo para que se adecue a su percentil. Este dispositivo es el que denominaremos físico o real.

La prueba en sí supone una dificultad para aquellas personas que intentan distorsionar el proceso de captura, ya que se les exige en todo momento un alto grado de concentración, al tener que coordinar varios movimientos con ambos brazos al tiempo que se utilizan otros sentidos como la vista o el oído. Además, se utiliza una máscara que reduce el campo de visión que el sujeto tiene del dispositivo. Esta máscara la podemos ver en el Anexo III.

El método utilizado para la captura también se basa en el sistema MH-Sensors. Se realizan dos series separadas entre sí por un periodo de descanso con el fin de recuperarse y obtener resultados comparables entre ambas series. En cada serie se realizan 32 movimientos, en cada uno de los cuales deberemos alcanzar el objetivo, portando en cada mano un bote de 1kg de peso. Estos movimientos se realizan de forma alterna con cada una de las manos.

Para este estudio se utiliza la misma secuencia de movimientos para cada una de las dos series de la prueba. En total tenemos 16 movimientos a cada lado, de los cuales solo se analizarán los 9 más exigentes.

A pesar de tener la posibilidad de crear diferentes secuencias se utiliza siempre la misma, porque así podemos comparar los movimientos entre diversas personas y establecer una normalidad.

7.2.1.2 Dispositivo M&R virtual

Con la prueba de campimetría funcional virtual, se pretende conseguir lo mismo que con el dispositivo M&R físico, pero en este caso, la persona interactúa con un dispositivo virtual alcanzando los mismos objetivos que en el dispositivo "real".

El objetivo de la prueba es valorar la capacidad del sujeto para alcanzar una serie de objetivos, por medio de una prueba de VR. Este entorno supone la pérdida de referencias externas del entorno real y la total libertad en la realización de los movimientos.

La metodología para la captura del movimiento va a ser la misma que para la prueba normal, salvo que en la prueba virtual, el dispositivo está creado mediante la reproducción virtual de las bandejas manteniendo una distribución espacial idéntica a la del dispositivo real. Así se consiguen reproducir los mismos movimientos que en el caso del dispositivo real, al tener que alcanzar las mismas bandejas.

En estas bandejas se depositará el objeto virtual, que será una esfera amarilla para las bandejas del lado derecho y roja para las del lado izquierdo. El sujeto tendrá que mover este objeto hacia las bandejas del lado derecho e izquierdo simultáneamente.

En esta prueba virtual la persona llevará una pesa de 1kg en cada mano, como se puede ver en la siguiente imagen. De este modo reproducimos las mismas condiciones de peso que se manejan en la prueba real. En el escenario virtual estos botes van solidarios a cada mano del avatar, siendo de color azul el de la mano derecha y verde el de la izquierda.

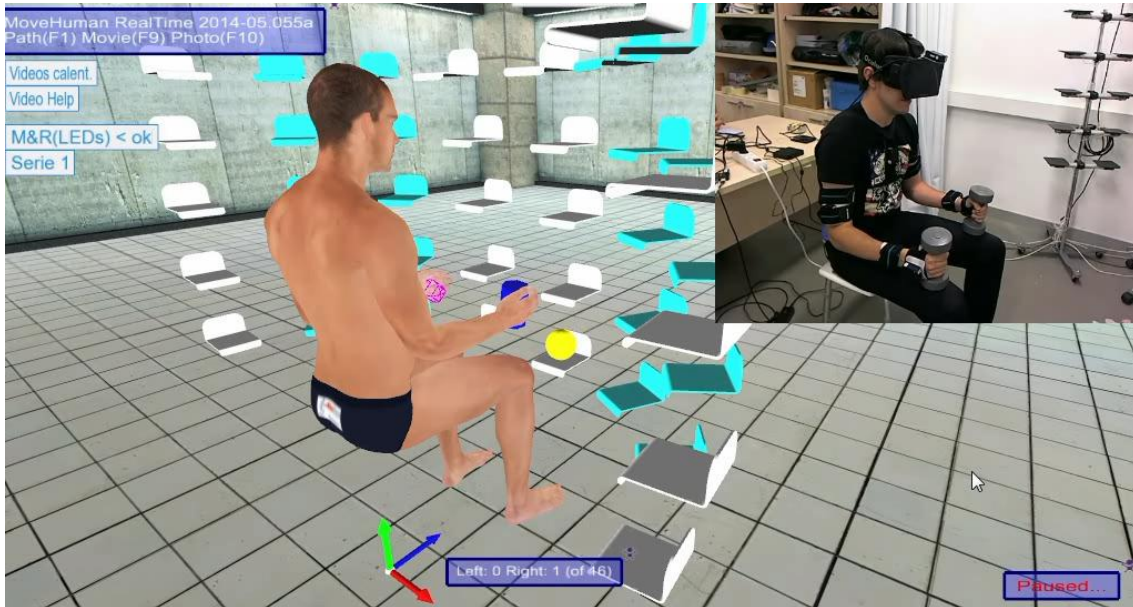


Fig 20. *Dispositivo M&R virtual.*

Para el desarrollo del dispositivo de M&R virtual se utilizan una serie de parámetros, con los que modificaremos las dimensiones del dispositivo, de modo que podremos acercar o alejar las bandejas, colocarlas más arriba o más abajo o incluso cambiar las dimensiones de las esferas.

Podemos hacer más grande la esfera cambiando el diámetro de la misma. Esto tendría dos efectos, el primero visual y el segundo de facilitar la prueba ya que al ser más grande no tendría que alargar tanto los brazos para alcanzarlo. Tras probar el dispositivo con varias personas se ha elegido un diámetro de 13 cm.

Los siguientes parámetros hacen referencia a los ángulos del campo de visión que tenemos del dispositivo virtual, de manera que tenemos un parámetro para el ángulo en el plano sagital (de color morado en la imagen) y otro para el ángulo del plano horizontal (de color verde en la imagen).

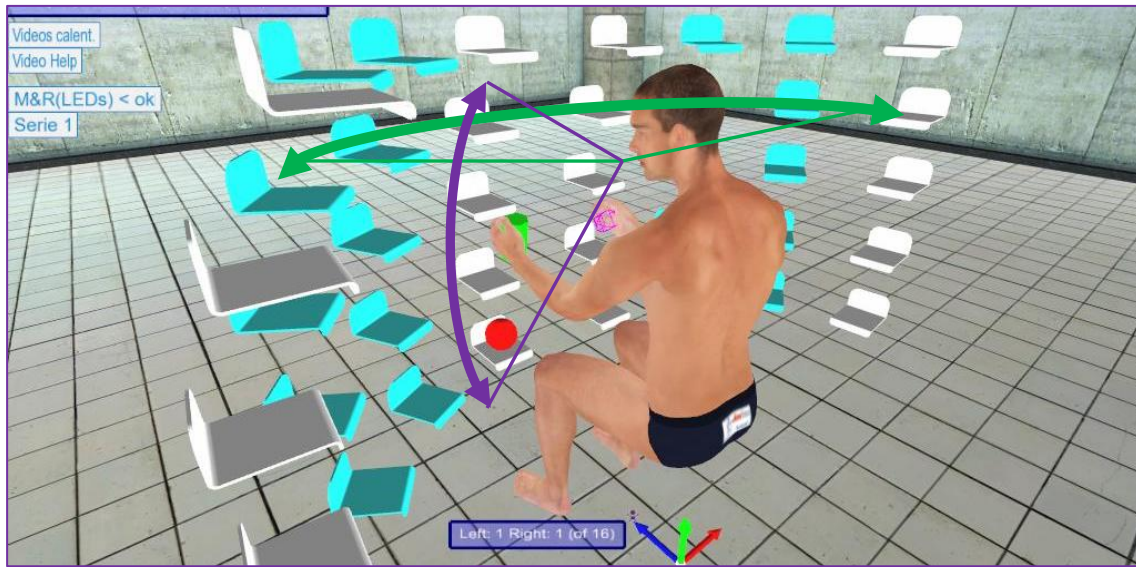


Fig 21. Parámetros de los ángulos de visión.

Se han escogido unos valores de 75° para el ángulo del plano sagital y 180° grados para el ángulo del plano horizontal.

También podemos modificar la distancia a la que situamos el dispositivo, pudiendo acercarlo o alejarlo del sujeto. Este parámetro es un coeficiente, que multiplica la distancia desde el sujeto al dispositivo con la que se ha diseñado inicialmente. Lo hemos dejado en 0.24.

Hay unos coeficientes para acercar las bandejas de los niveles superior e inferior en concreto. El nivel inferior corresponde a las bandejas situadas más abajo y el nivel superior a las bandejas situadas más arriba. En la siguiente imagen se muestran las bandejas desde el punto de vista del sujeto y se ha indicado con una línea en color rojo el nivel inferior.

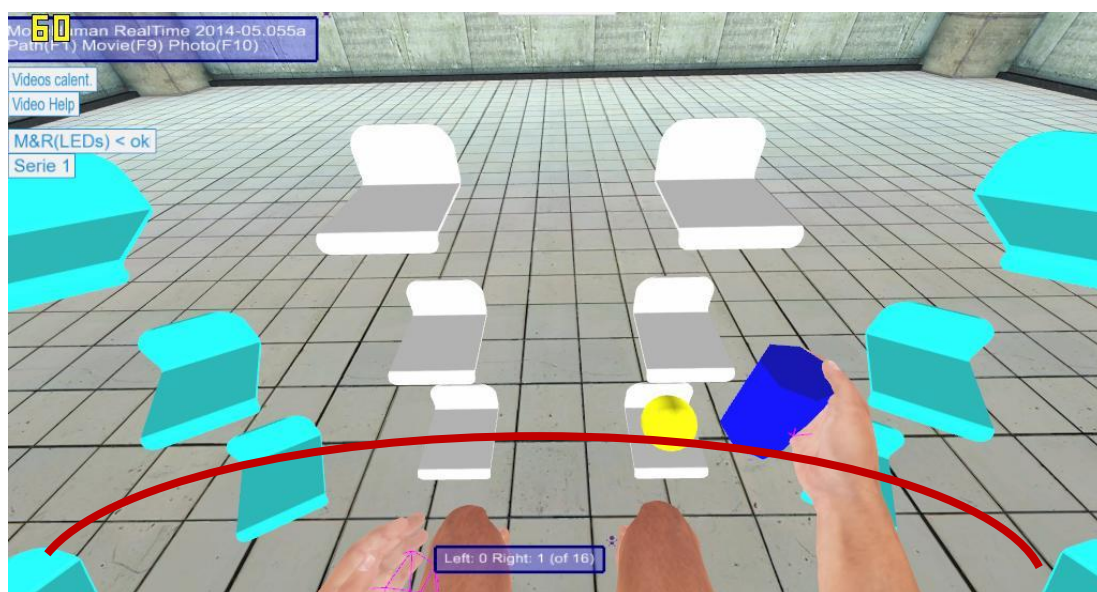


Fig 22. Escenario del dispositivo "Move&Reach" virtual.

Por último se muestran dos imágenes desde los dos lados del dispositivo. Cuando el sujeto se mueve hacia el lado derecho, sigue la esfera de color amarillo y lleva un bote azul. Cuando es hacia la izquierda, lleva un bote verde y la esfera es de color rojo.

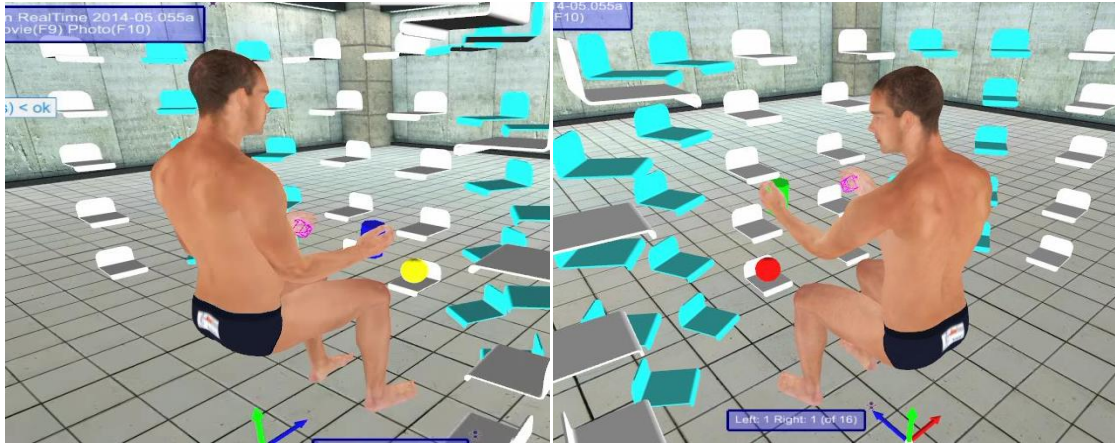


Fig 23. Vistas del dispositivo en ambos movimientos.

7.2.2 MOVIMIENTOS ESTUDIADOS

7.2.2.1 Dispositivo físico M&R

Movimientos de la cabeza:

Los movimientos puros de la cabeza: flexo-extensión cervical, rotación cervical e inclinación lateral serían los mismos que se han explicado en la prueba de rango cervical, por ello solo se detallan a continuación los correspondientes a los hombros.

Movimientos del hombro:

A efectos de esta prueba el ángulo que se analiza en la articulación del hombro es el ángulo de elevación del brazo. Corresponde al ángulo que forman el vector alineado con el brazo y el vector alineado con el tórax, tal como se representa en la figura siguiente. Será cero cuando el brazo esté en reposo y hasta 180° cuando se sitúe con máxima elevación vertical.

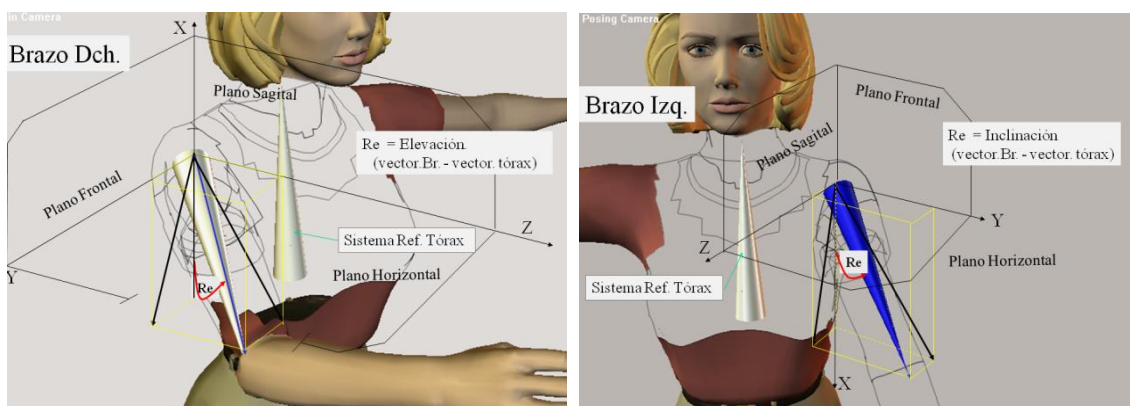


Fig 24. Ángulo de elevación del brazo.

En las siguientes imágenes se muestran algunos ejemplos de las posiciones más exigentes que se adquieren al alcanzar las distintas bandejas del dispositivo. Cada uno de estos alcances supone una combinación de movimientos de la zona cervical y de los hombros.

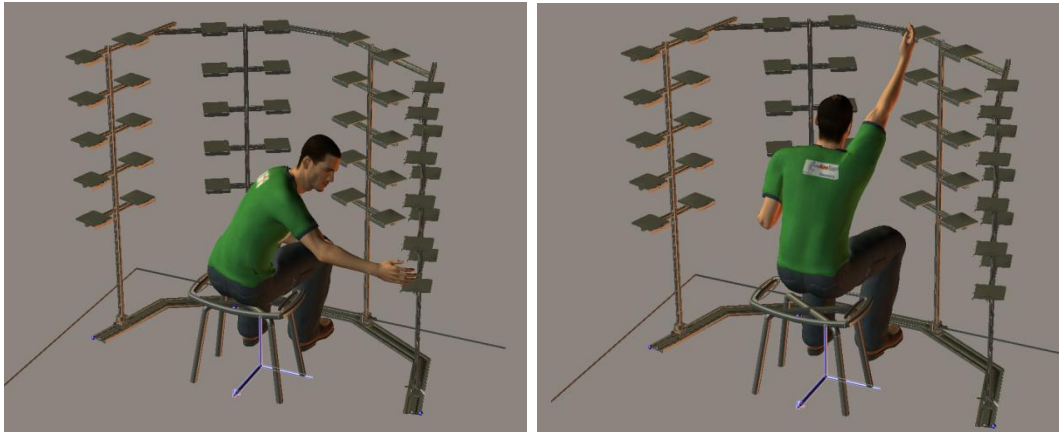


Fig 25. Posiciones adquiridas con alcance de objetivos laterales y frontales.

7.2.2.2 Dispositivo M&R virtual

En el desarrollo de la prueba se analizan los mismos movimientos que los vistos en la prueba normal, aunque la ejecución de los movimientos necesarios que tiene que llevar a cabo el usuario para alcanzar las bandejas de los diferentes niveles, será algo diferente.

En la prueba normal, la persona tiene que encontrar primero la luz para luego coger el bote que está en la última bandeja donde se había dejado y llevarlo a la bandeja con luz. En la prueba virtual, la persona se ve guiada por una esfera, que se va posicionando en las bandejas, de modo que tendremos que ir a tocarla con el bote que tenemos en la mano.

Primeramente cogemos la esfera donde se había dejado la última vez, para volver luego a la posición inicial. Luego deberemos llevar el bote a la nueva posición donde se sitúe la esfera.

Reproduciendo la captura de movimiento con la aplicación, podemos ver los momentos exactos en los que va alcanzando cada bandeja, analizando los ángulos máximos de los hombros o de la cabeza que se consiguen. En la siguiente imagen se ve un ejemplo en el que la persona alcanza una bandeja lateral del nivel inferior.

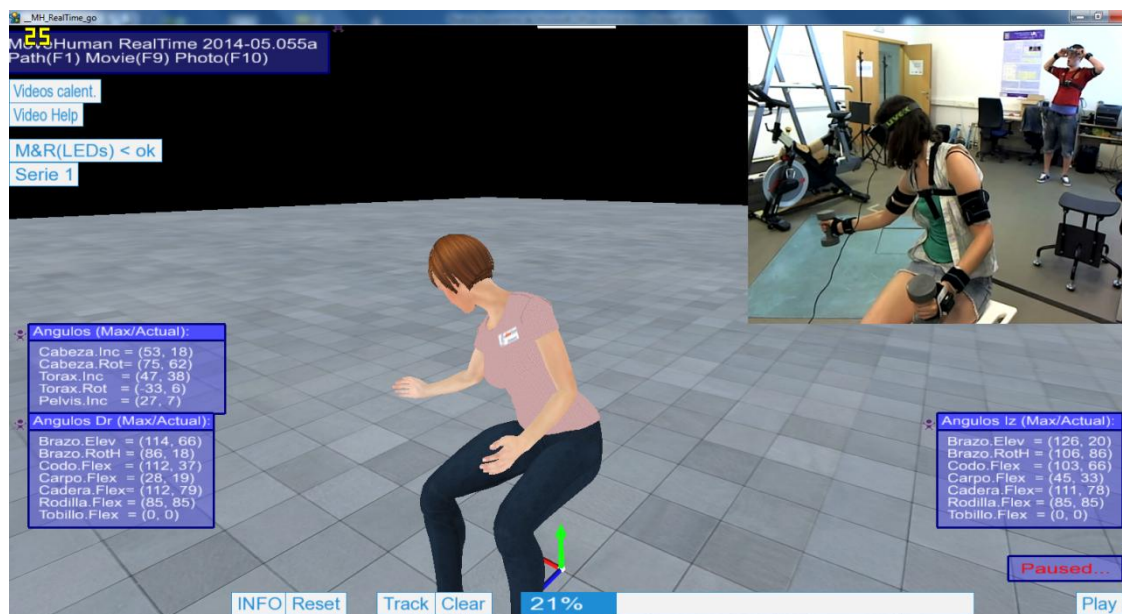


Fig 26. Datos de los ángulos alcanzados en un alcance lateral inferior.

7.2.3 DATOS OBTENIDOS

7.2.3.1 Dispositivo físico M&R

Los datos de los ángulos recogidos por los sensores hay que importarlos en unas hojas Excel para poder analizar los movimientos. Se analizan los valores máximos de los ángulos alcanzados tanto en la columna cervical como en hombros, para cada movimiento en cada una de las dos series y se comparan con los valores de normalidad.

Para la cervical, se han tomado los movimientos puros de los ángulos de flexo-extensión, rotación y lateralización y se han comparado con los de la normalidad. También se analiza el valor del rango completo del movimiento.

Para los hombros se han tomado los ángulos de elevación que el sujeto ha alcanzado en cada movimiento, comparándolos con la normalidad.

Dentro del Anexo VII podemos ver la tabla resumen de la hoja Excel de análisis donde se recogen los valores máximos alcanzados durante la prueba. En la siguiente imagen podemos ver el aspecto que tiene la tabla:

	HOMBRO				
	Serie 1	Serie 2	Máximo	Capacidad funcional	Contralateral
	Ang.	Ang.			
Mov.01.Dcha	143.2	136.4	143.2	121%	3%
Mov.01.Izda	130.4	128.8	139.2	110%	-3%
Mov.02.Dcha	130.3	130.0	143.2	111%	10%
Mov.02.Izda	129.3	127.9	130.4	110%	-9%

Fig 27. Ejemplo de los ángulos máximos que se registran de los hombros.

Se muestran tanto los máximos cervicales como los ángulos de elevación de los brazos para las dos series. También se incluye en esta tabla la capacidad funcional del sujeto para cada movimiento y la capacidad contra-lateral en porcentaje para aquellos movimientos que se hagan a ambos lados, de modo que podamos ver las diferencias de capacidad entre el lado derecho y el izquierdo. Se adjunta en este anexo una breve explicación de todos estos parámetros.

Se puede ver también dentro de la hoja de análisis, un gráfico en el que podemos seleccionar el momento exacto en el que alcanza el valor máximo, adjuntando una imagen de este alcance como ya se ha mostrado en la prueba de VR de la columna cervical. Se incluye un ejemplo en el Anexo VII.

También se puede incluir un gráfico de frecuencias, similar al visto en la prueba virtual de la columna virtual que muestran el porcentaje de tiempo en el cual que se ha estado alcanzando cada ángulo, organizados dentro de unos intervalos.

Para la prueba normal, la valoración de la capacidad de una persona para cada uno de los movimientos y ángulos antes referidos se establece comparando los resultados de la prueba del sujeto a estudio con los datos de normalidad. Estos datos de normalidad han sido el resultado de una muestra de personas sanas que previamente han realizado esta misma prueba.

En el Anexo VII se muestra la tabla de capacidad cervical que aparece en el informe y que muestra los ángulos y los rangos máximos alcanzados por el sujeto en cada movimiento así como el valor de la capacidad funcional que tiene respecto a la normalidad, asignando un percentil para cada movimiento analizado.

También podemos ver en este anexo la tabla que aparece en el informe en lo relativo a la capacidad de los hombros. En ella se muestran los ángulos máximos de elevación alcanzados por el sujeto en cada movimiento, tanto para el hombro derecho como para el izquierdo y también se le asigna un nivel que se corresponde con el percentil que se ha obtenido al compararlo con la base de normalidad.

7.2.3.2 Dispositivo M&R virtual

El análisis de datos de la captura será exactamente igual que con el dispositivo físico ya que se realizan los mismos movimientos al tener que alcanzar los mismos objetivos pero como ocurría en la prueba de rango cervical, los criterios de valoración de la capacidad que se van a establecer para la prueba "Move&Reach" normal, no se podrán utilizar para la prueba virtual, ya que la muestra que se ha estudiado no es lo suficientemente grande como para establecer una normalidad en esta prueba virtual.

7.2.4 TRATAMIENTO DE DATOS

De los datos obtenidos con la Hoja Excel de Análisis para la muestra de personas normales, se han cogido los valores de rangos máximos cervicales y de los ángulos de elevación de los brazos, obtenidos en ambas series. Se ha hecho esto tanto para la prueba con el dispositivo físico M&R como para la prueba con el dispositivo M&R virtual y el resultado son unas tablas como las que se muestran en el Anexo VIII.

Se han comparado los valores de rangos máximos obtenidos por la muestra en dispositivo M&R virtual con los obtenidos con el dispositivo físico M&R, con la misma fórmula empleada en el tratamiento de datos de la prueba de rango de columna cervical. En este caso, también se ha utilizado esta fórmula para comparar los ángulos de elevación de los brazos, obtenidos con los dos dispositivos.

En el Anexo VII se incluye una tabla, en la que se muestra la comparativa de los resultados obtenidos en ambas pruebas, incluyendo el porcentaje obtenido al aplicar esta fórmula, para comprobar la similitud de resultados que se obtienen al utilizar el dispositivo físico o virtual. En la imagen que aparece a continuación podemos ver un ejemplo:

CERVICAL						HOMBRO DCH.		
RANGO LATERALIZACION			RANGO ROTACION			Elevación con brazo derecho		
REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)	REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)	REAL	VIRTUAL	VR/REAL(%)
50,19	58,27	116%	124,19	119,40	96%	118,26	119,11	101%
88,81	73,27	83%	139,22	130,89	94%	124,99	128,57	103%

Fig 28. Comparación de los valores de rango alcanzados con ambas pruebas para cervical y hombros.

8 RESULTADOS

8.1 PRUEBA DEL RANGO DE LA COLUMNA CERVICAL

8.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DE PERSONAS NORMALES

8.1.1.1 Estudio de la normal distribución de los resultados

Dados los resultados de la muestra de personas normales, se sometieron a diversas pruebas estadísticas, mediante el programa estadístico "Minitab". Para evaluar la normalidad de los resultados, se escogieron, en base al volumen de la muestra a analizar, los test de normalidad de Anderson-Darling y Ryan-Joiner.

En este apartado, queremos contrastar, la hipótesis nula (H_0), de que los datos proceden de una población con distribución normal. Para los rangos de flexo-extensión y rotación se han obtenido resultados de p-valor superiores al nivel de significancia establecido en 0.05, dato que permite dar por válida la premisa establecida como H_0 de que los resultados siguen una distribución normal para estos rangos. En el caso del rango de lateralización se obtuvieron valores por debajo del 0.05 lo que nos indica que debemos rechazar la H_0 nula únicamente en este caso.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los estadísticos y p-valores:

Estudio de normalidad para la prueba de rango de la columna cervical

	R. Flex-Ext	R. Lat	R. Rot
AD	0,271	1,3	0,465
p-valor	0,655	<0,005	0,24
RJ	0,992	0,959	0,978
p-valor	>0,1	0,02	>0,1

Fig 29. Estadísticos y p-valores obtenidos para cada rango en el estudio de la normalidad mediante los métodos de Anderson-Darling y Ryan-Joiner.

8.1.1.2 Estudio de la varianza

Una vez comprobada la normal distribución, se ha hecho un análisis de la varianza para los resultados obtenidos tanto con la prueba virtual como con la normal. Los resultados obtenidos fueron coherentes para los rangos de flexo-extensión y rotación obteniéndose en ambos casos p-valores >0.05, lo que permite dar como válida la hipótesis nula que establece una semejanza estadísticamente significativa de los resultados obtenidos para estos dos rangos. Para la lateralización se obtienen p-valores menores a 0.05 lo que nos lleva de nuevo a rechazar la hipótesis nula para este caso.

Estudio de la varianza para la prueba de rango de la columna cervical

	R. Flex-Ext	R. Lat	R. Rot
p-valor	0,5	0,006	0,37

Fig 30. P-valores obtenidos en el estudio de la varianza para cada rango.

8.1.1.3 Estudio de la normalidad de los ángulos máximos de flexión y extensión

Vamos a descomponer el rango de flexo-extensión en los movimientos de flexión y extensión, para analizar estadísticamente los valores máximos alcanzados en la prueba virtual y normal. Utilizando los métodos de Anderson-Darling y Ryan-Joiner para ver la normalidad, se obtienen p-valores superiores a 0.05, lo que permite validar la hipótesis nula.

Estudio de normalidad de los ángulos de flexión y extensión

	Ang. Ext	Ang. Flex
AD	0,118	0,178
p-valor	0,989	0,913
RJ	0,996	0,994
p-valor	>0,1	>0,1

Fig 31. Estadísticos y p-valores obtenidos para los dos ángulos.

A pesar de que los datos siguen una distribución normal, podemos ver con los siguientes gráficos, que el ángulo máximo de flexión se mueve en intervalos diferentes según como sea la prueba, virtual o real. Para el caso de la extensión sí que son semejantes.

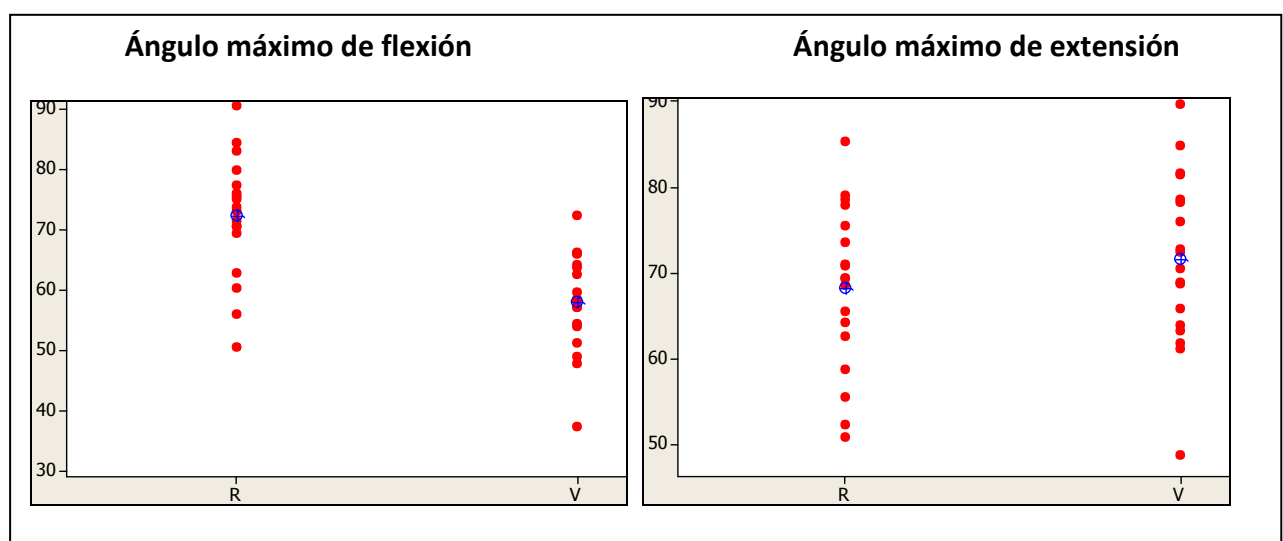


Fig 32. Datos de los ángulos de flexión y extensión alcanzados con ambas pruebas.

8.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DE SUJETOS DEL IMLA

Para la muestra de sujetos del IMLA se explican a continuación los tres casos que se pueden dar, según los resultados obtenidos y las impresiones recogidas durante la realización de la prueba normal y virtual de rango cervical:

- **La persona tiene una capacidad cervical normal**

Si analizando los datos obtenidos en la prueba normal, la persona tiene una capacidad funcional cervical normal porque su rango de movilidad está dentro de la normalidad, debería de obtener unos valores de rango de flexo-extensión y rotación semejantes en la prueba virtual. Si es así, podríamos confirmar que la persona ha colaborado en la prueba y que su capacidad funcional cervical es normal.

- **La persona tiene reducida la movilidad articular cervical**

La persona que tiene reducido algún movimiento siente molestias cuando intenta llegar al máximo. Además, la ejecución y el ritmo no será muy regular al tener que hacer un sobreesfuerzo. Los máximos alcanzados en la prueba normal cervical deberían ser similares a los de la prueba virtual, por ello en la prueba virtual la persona tendría bastantes dificultades para seguir las trayectorias completas.

- **La persona simula una reducción de la movilidad articular**

La persona que simula intenta fijarse en una serie de referencias externas durante la prueba normal de rango cervical, para parecer que tiene reducida la movilidad. La capacidad cervical podría no ser normal si los rangos obtenidos son inferiores a la normalidad, pero debería de obtener valores semejantes en la prueba virtual.

En la prueba virtual se abstraerá de toda referencia externa, y los rangos máximos de flexo-extensión y rotación alcanzados serán significativamente mayores que en la prueba real. Esta diferencia indica que el sujeto no ha colaborado en la prueba real.

8.2 PRUEBA DE CAMPIMETRÍA FUNCIONAL CON EL DISPOSITIVO M&R

8.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DE PERSONAS NORMALES

8.2.1.1 *Estudio de la normal distribución de los resultados*

Los resultados obtenidos en esta prueba se van a someter al mismo análisis estadístico que la prueba anterior de rango cervical. Además de analizar los rangos máximos para los movimientos cervicales, en este caso se evaluará también la normalidad de los ángulos de elevación que se han alcanzado con cada brazo, al utilizar el dispositivo M&R físico y virtual.

Para los rangos cervicales y los ángulos de elevación, se han obtenido resultados de p-valor superiores al nivel de significancia establecido en 0.05. Esto permite dar por válida la premisa establecida como H_0 de que los resultados siguen una distribución normal. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los estadísticos y p-valores:

Estudio de normalidad para la prueba de campimetría funcional con el dispositivo M&R

	R. Flex-Ext	R. Lat	R. Rot	Elev. Br. Dr	Elev. Br. Iz
AD	0,219	0,577	0,184	0,698	0,648
p-valor	0,807	0,113	0,894	0,057	0,074
RJ	0,99	0,959	0,99	0,95	0,952
p-valor	>0,1	>0,1	>0,1	0,066	0,098

Fig 33. *Estadísticos y p-valores obtenidos para los rangos cervicales y los ángulos de elevación de los brazos en el estudio de la normalidad.*

8.2.1.2 Estudio de la varianza

El análisis de la varianza para los resultados obtenidos con los dos dispositivos, será también similar al realizado en la prueba de rango cervical. Los resultados que se han obtenido son congruentes para todos los rangos cervicales y para los ángulos de elevación de ambos brazos, obteniéndose en ambos casos p-valores > 0.05, lo que da como válida la hipótesis nula que defiende una semejanza significativa de los resultados para los dos rangos.

Estudio de la varianza para la prueba de campimetría funcional con el dispositivo M&R

	R. Flex-Ext	R. Lat	R. Rot	Elev. Br. Dr	Elev. Br. Iz
p-valor	0,544	0,061	0,986	0,458	0,371

Fig 34. *P-valores obtenidos en el estudio de la varianza para los rangos cervicales y los ángulos de elevación de los brazos.*

9 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

9.1 PRUEBA DEL RANGO DE LA COLUMNA CERVICAL

9.1.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA NORMAL

Como se puede observar en las tablas adjuntas en el Anexo VIII, los rangos máximos de flexo-extensión siguen una tendencia ligeramente inferior en la prueba virtual si los comparamos con los obtenidos en la prueba real, ya que el porcentaje obtenido virtual sobre real es del 93%. Este hecho llamó la atención, ya que se esperaba que los rangos de flexo-extensión fueran similares o incluso ligeramente superiores.

Por esta razón se optó por hacer un estudio del rango de flexo-extensión separando entre flexión y extensión. Tras el estudio, se apreciaron diferencias según el método utilizado. Para la flexión se obtuvieron ángulos ligeramente menores con la prueba virtual y para la extensión se consiguieron ángulos ligeramente mayores.

En la prueba virtual, se utilizan una serie esferas que guían al sujeto, siguiendo unas trayectorias para la realización de los movimientos. Esto hace que la persona haga un mayor esfuerzo con respecto al que se hace en la prueba real en ciertos movimientos y un esfuerzo menor en otros. En el caso de la extensión, estas trayectorias sí que consiguen que el sujeto alcance ángulos ligeramente mayores que en la prueba real. Para la flexión en cambio, no se consiguen alcanzar ángulos ligeramente mayores que en la prueba real porque la trayectoria que sigue la esfera que guía al sujeto para la flexión, llega justo hasta los pies del mismo, siendo estos su límite.

En las siguientes versiones de la aplicación, esta limitación podría ampliarse con métodos que aumentasen este ángulo de flexión de algún modo.

Si pasamos a observar ahora los rangos máximos de rotación, vemos que son ligeramente mayores en la prueba virtual, siendo también semejantes con los obtenidos en la prueba de rango real, teniendo un porcentaje de la prueba virtual sobre la real de un 108%.

Tras este análisis, podríamos decir que la prueba de rotación estaría correctamente diseñada para la prueba virtual, ya que es perfectamente comparable a la real.

Los rangos de lateralización máximos obtenidos entre ambas pruebas, no serían comparables, debido a su diferencia. Si observamos los rangos obtenidos con la prueba virtual vemos que son bastante inferiores a los de la prueba real, y de ahí esa diferencia. Esto es debido a que las trayectorias seguidas en la prueba virtual no contienen movimientos estrictamente puros de lateralización ya que son difíciles de reproducir con trayectorias de movimientos conjuntos como las seguidas en la prueba real.

Después de este análisis, podemos decir que se debería buscar algún método para conseguir movimientos comparables de lateralización en la prueba VR con respecto a la prueba real.

9.1.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA MUESTRA DEL IMLA

Si nos vamos a las tablas correspondientes a la muestra del IMLA en el Anexo VIII, podemos ver en las dos primeras los valores de cada uno de los rango de movimiento estudiados para la prueba real y virtual, respectivamente. La tercera tabla muestra la comparativa de los valores obtenidos utilizando el método real o virtual y es aquí donde vamos a poder determinar si una persona colabora o no, ya que si efectivamente tiene reducida la capacidad de algún movimiento cervical, será incapaz de seguir la trayectoria y no conseguirá valores significativamente mayores en la prueba virtual.

En esta tercera tabla también aparecen los casos que nos podemos encontrar, ya explicados en el apartado de Resultados. Para cada sujeto de la muestra, aparece en la parte izquierda, la denominación que le corresponde según la discusión de los resultados obtenidos: NORMALIDAD sobre un fondo verde, DISCAPACIDAD sobre un fondo rojo y SIMULACIÓN sobre un fondo azul.

A continuación vamos a discutir los resultados que obtiene cada uno de los posibles casos en concreto. El sujeto que se denomina con la etiqueta de NORMALIDAD, tiene una capacidad funcional cervical normal porque su rango de movilidad está dentro de la normalidad. Analizando los porcentajes de la prueba virtual sobre real, obtenidos para cada rango de movimiento, vemos que se obtienen porcentajes similares a los obtenidos por la muestra normal. Es decir, son ligeramente inferiores para el rango de flexo-extensión (88%) y ligeramente mayores en el rango de rotación (106%). Como en el caso de la muestra normal, el rango de lateralización no es comparable entre la prueba real y virtual.

El siguiente caso a estudiar será el sujeto con DISCAPACIDAD. En la tabla comparativa de sujetos del IMLA del Anexo VIII, hay tres sujetos con esta denominación. Estos obtienen rangos por debajo de la normalidad. Si analizamos los porcentajes de la prueba virtual sobre la real para cada movimiento estudiado, vemos que la tendencia no se asemeja a la conseguida por la muestra normal, siendo inferiores para el rango de flexo-extensión (65%) y el rango de rotación (90%). El rango de lateralización no es comparable pero en cualquier caso los porcentajes obtenidos son inferiores a los normales.

El sujeto correspondiente a SIMULACIÓN será el último caso a estudiar. Este obtiene para la prueba normal valores de rangos máximos inferiores a la normalidad, pero obtiene unos valores de rangos máximos de flexo-extensión y rotación significativamente mayores en la prueba virtual, si los comparamos con la real. Esto queda reflejado en los porcentajes obtenidos de la prueba virtual sobre la real para cada movimiento. Vemos que no son similares a los obtenidos por la normalidad, siendo superiores en el rango de flexo-extensión (112%) y rotación (134%). Tras estos resultados, se puede decir que la persona no ha colaborado. Ha intentado simular una reducción al no llegar a los máximos de los movimientos.

9.2 PRUEBA DE CAMPIMETRÍA FUNCIONAL CON EL DISPOSITIVO M&R

Si se observan las tablas correspondientes a esta prueba en el Anexo VIII, vemos que los rangos máximos de flexo-extensión cervical obtenidos son ligeramente superiores en la prueba virtual y los rangos máximos de lateralización y rotación son ligeramente inferiores en la prueba virtual. A pesar de ello mantienen una gran similitud con los de la prueba de rango real, ya que el porcentaje obtenido virtual sobre real para estos rangos es del 105%, 96% y 96% respectivamente.

Los ángulos de elevación de los hombros que se obtienen con ambos métodos son muy similares, obteniendo unos porcentajes del 100% para el derecho y de un 99% para el izquierdo. Dato que podría justificarse por el hecho de que todos los participantes eran diestros, motivo por el cual tienen menos destreza con el brazo izquierdo.

Con la prueba de campimetría funcional virtual, se pretende conseguir lo mismo que con el dispositivo M&R físico, pero en vez de interactuar con un dispositivo físico real, la persona interactúa con un entorno virtual, alcanzando los mismos objetivos que en la real. La gran ventaja de esto, es que podemos prescindir del dispositivo físico y tenemos una mayor flexibilidad al poder diseñar un dispositivo virtual con distintas dimensiones y configuraciones sin apenas coste económico.

Tras el análisis de los resultados obtenidos por la muestra, podríamos decir que con el dispositivo virtual conseguimos valores muy similares a los conseguidos con el dispositivo físico en cuanto a rangos máximos cervicales y ángulos de elevación de los brazos, por lo tanto el uso del dispositivo virtual tendría la misma validez que utilizar el dispositivo físico.

10 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras un análisis de los resultados obtenidos con los métodos basados en tecnologías de Realidad Virtual (VR) utilizados en este proyecto, podemos afirmar que son adecuadas para valoración de la capacidad funcional y con ciertas ventajas frente a los sistemas convencionales.

La inmersión en un escenario virtual supone la pérdida de referencias externas del entorno real y la total libertad en la realización de los movimientos, lo que confiere a las pruebas que se realizan con esta tecnología, una característica de “validez evidente” a efectos de valoración funcional. Este hecho hace que la Realidad Virtual sea un método complementario útil para determinar personas que simulan una reducción de la movilidad cervical.

En relación a la prueba del rango articular y tras el análisis de los resultados obtenidos, se observa que los valores de los rangos máximos alcanzados en flexo-extensión y rotación eran bastante similares, siendo algo más exigentes en la prueba virtual para el caso de la rotación. En el rango de flexo-extensión eran ligeramente inferiores porque el propio entorno virtual nos limitaba para el caso del movimiento de flexión. Para la lateralización en la prueba virtual se alcanzaban valores significativamente inferiores, y esto era debido a la dificultad que supone seguir la trayectoria de un objeto con un movimiento de lateralización puro.

Si contrastamos los resultados en el dispositivo Move&Reach virtual, y los valores conseguidos con el dispositivo físico, se observa que en el dispositivo virtual se consiguen valores muy cercanos a los conseguidos con el dispositivo físico, demostrando ser una posible alternativa al dispositivo físico con interesantes ventajas en los aspectos de portabilidad, flexibilidad en el diseño y economía.

Además de garantizar unos buenos resultados, la Realidad Virtual ofrece otra serie de ventajas. Desde el punto de vista de desarrollo, es una tecnología personalizable, ya que podemos modificar las dimensiones de las formas y escenarios que aparecen, cambiando una serie de parámetros de una manera muy rápida y sin una dificultad notable.

Otra ventaja es la comodidad que ofrece a los sujetos sometidos a las pruebas. La muestra de sujetos que han realizado las pruebas no ha referido en ningún momento sensación de vértigo al utilizar la tecnología de Realidad Virtual y tampoco han manifestado ninguna dolencia o incomodidad causada por la instrumentación durante la prueba.

A pesar de ofrecer muchas ventajas, es cierto que para algún movimiento concreto es difícil reproducir la misma amplitud que se consigue con la prueba normal. Tampoco es fácil reproducir la ejecución de los movimientos con el dispositivo M&R físico, ya que se debe manejar un peso en un espacio virtual donde no podemos apoyarlo sobre una bandeja real limitada. Esto hace que se necesite más tiempo para realizar la prueba virtual y que el sujeto realice un calentamiento más completo para familiarizarse con la escena virtual.

La Realidad Virtual es una herramienta que nos ofrece múltiples posibilidades para desarrollar sistemas que hasta ahora solamente conocíamos de modo real, ya que con ella se pueden simular situaciones de la realidad.

Podemos ver que la Realidad Virtual ha adquirido una gran importancia en estos últimos años y cada vez son más los estudios de investigación que hacen referencia a esta tecnología en varios campos de la medicina y la ingeniería.

Por ser una tecnología reciente, las expectativas de futuro son muy altas y las líneas futuras en valoración de capacidad funcional apuestan fuertemente por ella como herramienta para la evaluación, por su simplicidad, operatividad y objetividad.

11 REFERENCIAS

1. Marín Zurdo, J. J.; I. García Muñoz. C. Gil Benito. M.J. Boné Pina. 2010. "Validación de sistema de medición de capacidad funcional basado en sensores inerciales". XXVIII Congreso de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica. Actas Congreso. Madrid 11/2010.
2. American Medical Association (AMA) (2004) Guías para la evaluación de las deficiencias permanentes. Ministerio de Asuntos Sociales. Instituto Nacional de Servicios Sociales INSERSO.
3. Real Decreto 1971/1999, de 23 de diciembre, de procedimiento para el reconocimiento, declaración y calificación del grado de minusvalía.
4. Real Decreto 8/2004, de 29 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre responsabilidad civil y seguro en la circulación de vehículos a motor.
5. Ley 34/2003 de 4 de noviembre de modificación y adaptación a la normativa comunitaria de la legislación de seguros privados. BOE 5-11-2003.
6. López-Ibor Aliño JJ, Valdés Miyar M. DSM-IV-TR :Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales. Ed en español de la 4ª rev de la obra original en inglés, [reimp ed. Barcelona etc: Masson; 2010:1049.
7. Aso Escario J, Martínez Quiñones JV, Aso Vizán A, Arregui Calvo R, Bernal Lafuente M, Alcázar Crevillén A. Simulation in spinal diseases. *Reumatología Clínica*. 2014.
8. Miralles RC. Valoración del daño corporal en el aparato locomotor. Masson. 2001. ISBN13: 978844581081-1.
9. Capilla Ramírez P, González Ordi H. Revisión: Simulación en patología dolorosa crónica del raquis cervical (cervicalgia/esguince cervical). *Revista Española de Medicina Legal*. 2012;38(2):76.
10. Sarig-Bahat H, Laufer Y, Weiss PL. Neck pain assessment in a virtual environment. *Spine*. 2010;35(4):E105.
11. Turolla A, Dam M, Tonin P, et al. Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: A prospective controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2013;10(1).
12. Carrougier GJ, Hoffman HG, Nakamura D, et al. The effect of virtual reality on pain and range of motion in adults with burn injuries. *Journal Of Burn Care & Research: Official Publication Of The American Burn Association*. 2009;30(5):785.
13. Perez-Marcos D, Sanchez-Vives MV, Slater M, et al. A fully immersive set-up for remote interaction and neurorehabilitation based on virtual body ownership. *Frontiers in Neurology*. 2012;JUL.
14. Zakzanis KK, Quintin G, Graham SJ, Mraz R. Age and dementia related differences in spatial navigation within an immersive virtual environment. *Medical Science Monitor*. 2009;15(4):CR140.
15. MARCO JH, PERPIÑA C, BOTELLA C. Effectiveness of cognitive behavioral therapy supported by virtual reality in the treatment of body image in eating disorders: One year follow-up. *Psychiatry research (Print)*. 2013;209(3):619.

16. Lorenzo G, Pomares J, Lledo A. Inclusion of immersive virtual learning environments and visual control systems to support the learning of students with asperger syndrome. *Comput Educ.* 2013;62(3):88.
17. KRIJN M, EMMELKAMP PMG, BIEMOND R, DE WILDE DE LIGNY, Claudius, SCHUEMIE MJ, VAN DER MAST, Charles A. P. G. Treatment of acrophobia in virtual reality: The role of immersion and presence. *Behav Res Ther.* 2004;42(2):229.
18. Marín Zurdo J. J., et al. Proceedings of the Sixth International Conference on Occupational Risk Prevention. Mondelo, P., et al ed., 2008. "Move-Human Sensors: Sistema Portátil de Captura de Movimiento Humano basado en Sensores Inerciales para el Análisis de Lesiones Musculoesqueléticas y utilizable en entornos reales". ISBN 84-934256-5-6.
19. Marín Zurdo, J. J.; Boné Pina, M.J, and Benito Gil, C. "Evaluación de Riesgos de Manipulación Repetitiva a Alta Frecuencia Basada en Análisis de Esfuerzos Dinámicos en las Articulaciones sobre Modelos Humanos Digitales". *Ciencia & Trabajo*, 2013, vol. 15, no. 47. pp. 86-93.
20. Marín Zurdo, J.J.; Boné Pina MJ, Martínez Jarreta MB. "Método MH-FORCES para valoración del riesgo de Trastornos Musculoesqueléticos derivados de movimientos repetitivos, comparación con método OCRA". *Actas congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales. ORP 2014. Zaragoza 05/2014.*
21. Huston, Ronald L. *Principles of Biomechanics* (2009). CRC Press Taylor & Francis Group.
22. Nordin M, Frankel V. *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. McGraw-Hill. Interamericana, D.L. Madrid, 2004.
23. Yang X, Petriu DC, Whalen TE, Petriu EM. Hierarchical animation control of avatars in 3-D virtual environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 2005;54(3):1333.
24. Jeffrey C. Woldstad. *Digital Human Models for Ergonomics*. University of Nebraska-Lincoln. 01-01-2000
25. Título de la Patente: Dispositivo y Método para la Evaluación de la Capacidad Funcional. Inventores: J.J. Marín Zurdo. J.M. Auría Apilluelo. J.L. Huertas Talón.
Nº. de solicitud: P201230353
País de prioridad: España
Fecha presentación: 09-03-2012
Entidad titular: Universidad de Zaragoza.
Empresa/s que la explotan: Sociedad de Prevención de FREMAP (fecha contrato: 14-09-2012).